山西大学2004届硕士研究生

学位论文

中国先秦时期的音乐科技研究

姓　　名　张　娟

导　　师　高　兴　教授

专　　业　音乐学

研究方向　中国音乐史

学院(中心、所)　音乐学院

学习年限　2001年9月—2004年7月

二〇〇四年六月

山西大学 2004 届硕士研究生学位论文

中国先秦时期的音乐科技研究

姓　　名： 张　　娟

导　　师： 高　　兴 教授

专　　业： 音 乐 学

研究方向： 中国音乐史

系　　所： 音乐学院

研究方向： 中国音乐史

学习年限： 2001 年 9 月—2004 年 7 月

二零零四年五月

Thesis for the 2004 Master's Degree of Shanxi University

The Research on the Science and Technology in Music of Pre-Qin Period in China

Postgraduate: Zhang Juan

Tutor: Prof. Gao-Xing

Major: Musicology

Specialization: Music History of China

Department: Conservatory of Music

Study period: Sep. 2001—July. 2004

May 2004

内容提要

回顾几千年中国音乐史的发展历程，我们可以看到，促进中国音乐发展的因素有很多，如：经济基础、哲学思想、音乐观念、音乐制度、对外音乐交流、艺术保护者等等。这些因素都在一定程度上影响并推动着中国音乐艺术的发展。但是就目前音乐学界的研究状况来看，对于科学技术的发展对音乐史上音乐艺术的影响作用却没有得到足够的重视。

我国是一个文明古国，古代科技水平曾经领先于世界，在音乐艺术发展史上写下许多光辉的篇章。本文试对我国先秦时期科学技术的发展对音乐艺术的影响作用进行考察，从音乐科技史料和出土文物两个方面，探讨科学技术在中国音乐艺术发展史上的作用。

本文包括四部分：第一部分，介绍中国科学技术的整体发展情况及先秦时期科学技术发展所取得的主要成果；第二部分对先秦时期的音乐文献史料和考古出土的实证材料进行整理和归纳；第三部分是本文的重点，在对文献史料和考古材料归纳的基础上探讨先秦时期音乐科技的发展高度；第四部分是本文的结语部分，通过前三部分的论述论证音乐与科技之间密切的联系。正是有了先秦时期科学技术的高度发展才有了先秦音乐文化灿烂辉煌的成就，同时指出发展音乐科技这一边缘学科有着重大的现实意义和广阔的前景。

关键词：　先秦时期　音乐科技　文献史料　考古实证材料

Abstract

Look back the develop course of the history of thousands of years of Chinese music, there are a lot of factors that promote Chinese music to develop, such as: Economic basic, philosophy ideological, music idea, music system and music exchanging and protector of art and so on. These factors on certain level influenced and promoted the development of Chinese music art. But for the present research condition of music circle, there are not enough attention has been paid to the affect of science and technology that has taken on history of Chinese music.

The level of science and technology of ancient China has been in the lead in world, and has influenced the development of Chinese music. The dissertation will investigate music document and unearthed instruments of pre-Qin period and discuss the role of the science and technology in the history of Chinese music.

This dissertation includes 4 parts: It is the first to introduce the whole condition and the major achievement of science and technology in ancient china; Second part sorts out and sums up the music document and the unearthed instrument archaeological studies of pre-Qin; The part of 3rd is the focal point of this paper, discussing the level of the science and technology in music of pre –Qin period on the foundation of summing up the music document and the archaeology material. The part of 4th is the conclusion of this paper, testifying the close connection between science and technology and music and pointing out that developing the borderline subject will have significant realistic meaning and wide prospect.

Keyword Pre-Qin period Science and technology in music Music document unearthed instruments

目 录

引言……1

一 先秦时期中国科学技术的发展概况……1

1.中国历史中的科学技术发展分期……1

2.中国先秦时期科学技术取得的主要成果……2

二 先秦时期音乐科技文献史料与考古实证材料……7

1.音乐科技文献史料……7

2.音乐考古实证材料……9

三 中国先秦时期音乐科技成就……17

1.音乐中的自然科学观……17

2.音乐声学……20

3.音乐数学……24

4.乐器制造中的材料工艺技术……26

结语……28

参考文献……30

附录 1 先秦音乐科技文献史料……32

附录 2 先秦音乐考古实证材料……39

致谢……46

引 言

回顾几千年中国音乐史的发展历程，我们可以看到，促进中国音乐发展的因素有很多，如：经济基础、哲学思想、音乐观念、音乐制度、对外音乐交流、艺术保护者等等。这些因素都在一定程度上影响并推动着中国音乐艺术的发展。但就目前众多的音乐学论著来看，有一个对中国音乐史发展有重要影响的因素，却一直都没有得到重视，即科学技术的发展对音乐发展的影响。

纵观历史发展进程，是科技的发展带动了音乐的发展。音乐艺术的历史沿革，它的每一个前进的脚步，无不伴随着社会的发展和科学技术的进步；音乐内涵的每一个方面都与科学技术的发展息息相关，包括音乐思维、音乐的结构、乐器制造工艺、乐器发声原理、乐制、音乐音响等等。

我国是一个文明古国，古代科技水平曾经领先于世界，在音乐艺术发展史上写下许多光辉的篇章。本文试图对我国先秦时期科学技术的发展对音乐艺术的影响作用进行考察，从音乐科技史料和出土文物两个方面，探讨科学技术在中国音乐艺术发展史上的作用。

一 先秦时期中国科学技术的发展概况

中国的科学技术曾经取得了辉煌的成就，在探讨先秦时期的音乐科技的发展状况与成果之前，我们有必要对中国科技史的整体发展情况及先秦时期科技的主要成果作简单介绍。

1. 中国历史中的科学技术发展分期

科学技术是社会生产力发展中最活跃的因素，也是人类文明的重要标志。广义的科学是指人们所获取的关于自然、社会和思维的知识体系；技术则是指那些人们为能更有效地实现其目的而采取的方法和程序。二者都是人在改造客观世界活动中对客观规律认识的凝聚物。

中国古代科技指中国鸦片战争以前自然科学和生产技术产生和发展的历史，它包括古代劳动人民的自然科学知识和生产技术的产生、积累、发展与流传的过程和规律。中国古代科技的发展大约经历了四个阶段、两个高峰[①]：

第一阶段是先秦时期（远古－公元前221年），是古代科技的产生期，在春秋战国出现了我国古代科技的第一个高峰。主要成就表现在四方面：㈠ 是把作为奴隶制文化标志的青铜文化发展到更高水平；还出现了生铁冶铸技术，从而使金属冶炼工艺基本完善起来。㈡ 是四分系统历法的确立。㈢ 是以《墨经》、《管子》等著作所表现的理论科学的萌芽。㈣ 以《素问》为代表的中医基本理论的形成。

第二阶段是秦汉至南北朝（公元前221年一公元580年），是古代科技的发展期。三国两晋南北朝是古代科技发展的第二个高峰。它的主要成就首先是炼丹术所带来的化学知识

① 刘洪涛，《中国古代科技史》，南开大学出版社，1991年，《中国古代科学技术的回顾》

的增加。其次是数学方面的巨大成就。再其次是地理学的发展，晋·裴秀“制图六体”的提出，成了以后累朝奉行的准则，一直持续到西洋地图传入以前。

第三阶段是隋唐至元末（公元 581 年－1368 年），是古代科技发展的延展期，发展速度明显缓慢。主要表现于二方面：(一) 是科学技术的发展逐渐转变为以技术发展为主体，科学成就明显减少，以纺织、陶瓷、建筑为代表的技术研究迅速崛起；(二) 是科技发展表现为科技成就量的缓慢增加，很少再有质的突破。

第四阶段是明清时期（公元 1368 年－1840 年），也是西洋科技的传入时期。中国科技以历算学受西学影响最大，除吸收了对数、三角等西洋新法外，还开始注重对义理的研究，使科学结构发生了变化。此外，如地理学、测量、机械等也程度不同地受到了影响。

中国是世界上文明发达最早的国家之一。包括春秋战国时期科学技术成就在内的中国古代科学技术，曾经在世界上长期居于领先的地位，对人类文明和科学技术的发展做出了巨大的贡献。

2. 中国先秦时期科学技术取得的主要成果

先秦时期中国的科学技术得到了巨大的发展，最终形成了中国科技史上的第一个发展高峰，其具体的成果表现以下几个方面：

2.1. 石器工具制造及陶器制造技术

在原始社会，人们用石器对付野兽的袭击，采集草根，获得必要的食物，石器是原始人维持茹毛饮血的原始生活的重要工具，原始的科学技术就诞生在石器制作的过程中。

旧石器时代的石器简单、粗糙而又笨重，大多是利用燧石、火石、石英、石英岩、砂岩、角页岩等坚硬石料的砾石打制而成。在旧石器时代初期，石片的加工主要是用石锤沿着石片刃的两边敲打，修整出合适的锐角来。到旧石器时代中期，甚至更早一些，修整的技术有了改进，开始用木棒或角棒等代替石锤，这样修整出的石器精细一些。

新石器时代与旧石器时代相比，石器制作的主要不同在于出现了用玛瑙、红绿燧石等坚硬而稀少的石料做成的精巧的小型石器，即所谓的“细石器”。石质工具的制作以磨制加工为特点，目的性很强，石器的形状、大小、厚薄等等都与工具的不同用途密切联系在一起。新石器时代磨制石器的进步，还表现在穿孔技术的提高。当时大致有钻穿、管穿、琢穿 3 种方法。随着石料加工技术的提高，新石器时期石器的种类也大大增加了，除了农业用具、木工加工工具和兵器外，还有谷物加工用的石磨盘、石磨棒、石杵、石臼等，纺织用的石纺轮，捕鱼用的石网坠、制陶用的拍子等等。

生产工具制作法的改进，种类的增加，使生产力大大提高，人们才有可能定居下来，这使得制陶产生并发展起来。早在 1 万年前新石器时代的早期，人们就发明了制陶技术。

陶器的制造，一般要经过和泥、制坯、烧造三个阶段。制坯有手制、轮制两种方法[①]。烧造是指用加热的方法把陶坯变成陶器的整个物理化学过程。烧制陶器最初是露天进行的。人们把晾干的陶坯放在柴草堆上，点火燃烧柴草，烧制陶器。由于温度较低，陶坯受热不

[①] 殷玮璋 曹淑琴 《中国远古暨三代科技史》，人民出版社，1994

均匀，烧成的陶器表面往往出现红褐、灰褐等不同颜色，陶胎的断面上可以看出未烧透的夹心。后来出现了陶窑，温度较高，陶器在窑内受热均匀，质量明显提高，颜色也较一致。后来在烧陶的过程中采用渗碳的方法，烧出的陶器呈黑色，称为“黑陶”。

商代人仍以陶器作为其主要的生活用具，因此制陶业在商代得到进一步发展。陶器的品种增多，形制相当规范，不少器物上出现装饰纹带，有兽面纹、云雷纹、夔纹等。当时制陶的方法仍有手制、磨制、轮制等几种。商代的陶器除一般常见的灰陶、红陶和黑陶外，还有专供奴隶主贵族使用的白陶和原始瓷。商代的白陶器皿制作规整，刻有精致的装饰纹样，工艺更精，是当时制陶技术的代表作，具有相当高的水平。

中国先秦时期特别是旧石器时代和新石器时代石器打制技术和陶器制作技术的发展，为中国古代音乐史上“石”类乐器和“土”类乐器的发展起到了很大的推动作用。

2.2. 农业

从原始社会起，人类在采集野生植物种子的过程中，逐渐认识了植物及其生长规律，萌发了原始的农业，这是人类发展史上具有决定性意义的事件。农业的出现，被认为是新石器时代的一次革命。

在农业出现以前，原始人在长期的采集活动中，逐渐掌握了一些野生植物的生长规律。他们看到了落地的种子与禾苗生长、发育的关系，于是进行人工栽培的尝试。当时种植的农作物主要是“南稻北粟”。农业出现以后，人们在长期的生产实践中不断摸索，积累经验，使耕作技术逐渐得到改进，经历了火耕阶段。大约在距今六七千年前后，我国古代先民已掌握了锄耕或耜耕方法。新石器时代晚期，一些地方已进入犁耕农业阶段还出现了原始灌溉工程。

商王朝时期青铜工具的出现，促进了农业技术的发展。农业生产技术的提高、灌溉的兴起、管理职能的加强，使农业的产量比新石器时代有了较大提高。农业成为商代经济中主要的生产部门。

西周时期种植的农作物仍以粟、稷为主，除此之外还有麦、稻等谷类和大豆、大麻、高粱等。人们在耕作技术、土地整治、农田水利、农作物选种和田间管理等方面都已经积累了一定的经验，已经懂得了选择种子与作物生长的关系，开始重视留下好种子的工作。

春秋战国时期形成了我国古代的农业技术体系[①]。大量资料证明，“顺天时，行农事”已经成了农业的重要原则，按照时令不同，建立起一套较为固定的农田耕作制度，是春秋战国时期农业技术发展的重要表现。铁器得到广泛应用，开始使用V型铁铧犁和牛耕，加快了农田开发和精耕细作传统的形成。凿井技术得到提高，有了大规模的水利工程，无论治水和用水的技术都有显著提高，对水流的性能也有了初步认识。

中国农业的发展，推动了中国音乐史上音乐艺术与农耕文化相结合的思维观念的提高。

2.3. 金属冶铸业

在世界的古代文明中，无论哪一个地方，最初使用的都是铜器，然后才进入铁器时代，

[①] 刘洪涛　《中国古代科技史》，南开大学出版社，1991年，第65页

中国也不例外[①]。最初，铜经常是以自然铜的形式出现的，由于这种铜质比较软，不能用来制造武器和生产工具，为了提高其硬度以利于铸造，古代先民采取了在铜中掺进其他金属以得到铜合金的工艺。铜合金中最普遍的是铜和锡或铅的合金，即青铜。

新石器时代晚期出土的铜金属制品，原料主要是自然界赋予的自然铜，但也有部分是冶炼而得。冶炼的方法是用锡矿石和含多种元素的铜矿石来冶炼。人们用冷锻法制器，或用石质和泥质的单面范、双面范铸造形制简单的小件物品。

从二里头时期至二里岗时期，是青铜业趋于成熟的阶段。出土的物品除工具、兵器外还有各种容器和铃。其中工具、兵器用单范、双范铸造，其他容器都用复合范铸造。形制比较规整，器壁厚薄也较均匀，说明工匠们使用复合范铸器的工艺已相当成熟。

商代晚期和西周时期是我国青铜时代的鼎盛时期。这一时期铸造的青铜器，不仅器形大，数量多，而且纹饰华丽，铸工精良。商代与西周的工匠们已经掌握了在红铜中加锡矿石或铅矿石一起冶炼合成青铜，或先分别炼出铜、锡、铅和铅锡合金，然后再按一定比例放在一起熔炼青铜的技术。青铜时代制作的青铜器，几乎都是用陶范铸造的。到商代晚期，具有我国独特色彩的陶范熔铸术基本形成。当时铸造一件铜器，要经过以下工艺过程：用粘土和砂制作模、范——翻制泥范——用原模刮制成泥芯——阴干泥芯与泥范，高温烘烤并予修整——将陶范与范芯组装起来并固定——浇注铜液——拆去范、芯——加工、修整、加磨得到成品。

战国时代开始，青铜的地位逐渐被铁所代替，但春秋战国时期青铜的冶炼、浇铸、加工工艺还是有明显的发展和提高。人们总结除了“六齐”，即青铜组成的六种不同配比。成书于春秋时代的《周礼·考工记》记载了世界冶金史上最早的合金配比工艺。

春秋中期到战国时期，单一的陶范铸造已发展到综合使用浑铸、分铸、失蜡法、锡焊、铜焊等方法。冷加工技术，可以制造出薄而有刻制花纹的器物；春秋后期产生了“金银错”、“鎏金”、“刻纹”等新工艺，使得这一时期的青铜器更加华丽精美。

先秦金属冶炼技术的进步改进了当时生产工具、生活用具，同时也对音乐艺术中“金”类乐器的发展提供了条件，为先秦时音乐艺术取得的辉煌成就提供了可能。

2.4. 天文学

所谓天文，就是天象，就是日月星辰在天幕上呈现出的有规律的运动现象。

我国古代天文历法最主要的组成部分是历法。而历法则是利用天象的变化规律来调配年月日时的一种计时规则。简单地说，历法是计量年、月、日、时的方法，就是年月日时的安排调配[②]。在以推步为主要手段的科学历术还未产生之前，我国先民经历了一个漫长的“观象授时”的年代。其所观之象一是天象，即日月星辰（太阳、月亮、北斗、五星和二十八星宿）的运行规律；二是物象，即动植物顺应节气而发生变化的现象规律，以花鸟鱼虫等物候作为时宜的标志；三是气象，即风雨雷电等气象变化所显示的规律。

我国古代居民对天文学知识的认识与探索有着悠久的历史。

早在旧石器时代，我们的祖先就已注意到暑往寒来、月亮的盈亏圆缺、各种动物的活

① [日]薮内 清 《中国·科学·文明》，中国社会科学出版社，1987，第25页
② 蒋南华 《光辉灿烂的古代天文历法》，贵州社会科学，2001.1

动规律、植物的生长与成熟的周期等等，并且逐渐摸索到它们的规律。农业出现，促使了天文与历法知识的产生。在新石器时代早期，人们已经有意识地观测天象用以确定方位，时间与季节。

夏王朝时期的农业有了比较迅速的发展，人们从农业生产的实践中，对一年内的季节变化有了更深刻的认识。夏代已经有了明确的日、月、年的概念。1年分为12个月，以冬至后两个月的孟春之月作为1年的开始。同时还出现了六十甲子记日法，即用天干地支计算年、月、日，组成60个组，60天为一循环，记为两个月，有大月、小月之分。

商王朝时期，人们将天象的变化与相应的物候糅合在一起，在观测天象、确定季节的探索中取得了重要的成果。《尚书·尧典》中记载了用四组恒星黄昏时在正南方天空的出现来定季节的方法，并且有了春分、夏至、秋分、冬至四个节令。

中国古代的天文学，在春秋战国时期初步确立了自己的独立体系。随着天文观测资料的积累，建立起了以四象（朱雀、玄武、青龙、白虎）、三垣（紫微垣、太微垣、天市垣）、二十八宿[1]、十二次[2]为代表的星象坐标体系；在对日、月、五星运动规律深入研究的基础上，确立了阴阳合历的制历规则，春秋后期产生了"四分历"，标志着我国的历法制定已然成熟；并且这个时期已经有了世界上最早的日食、流星雨、哈雷彗星的记录。

先秦时期在对天体运行规律所进行的理性概括中，出现和形成了关于宇宙起源、结构和演化的一些理论学说，给我国后世宇宙论的发展提供了一个基础。先秦我国古代关于天地结构的思想，主要是盖天说。在人类社会的早期，人们根据直观感觉，认为天在上旋转不已，地在下静止不动，由此逐渐产生了"天圆地方"的思想，在商代后期和西周初期，在此基础上形成了"第一次盖天说"。在对"天元地方"的否定过程中产生了"第二次盖天说"。

关于宇宙的起源和演化的问题，成书于公元前400年左右的《老子》中讲到："道生一、一生二、二生三、三生万物。"从道家的"道"，后来又衍生出"太极"、"无极"等概念。战国时期的《周易·系辞传》称："易有太极，是生两仪，两仪生四象"，说明天地（两仪）和春夏秋冬（四象）都是从"太极"中演化出来的。这是两套各领风骚的宇宙论学说，二者后来相互影响、相互补充，共同为中国人建构了一个"玄而又玄"而又生生不息的壮丽宇宙，并由此成为中国一切文化领域的关键内核，其影响几乎波及到了中国传统文化的所有层面。

春秋战国时期，也诞生了以"气"为宇宙本原的学说。《庄子》："气变而有形，形变而有生"；"通天下一气耳"；《黄帝内经·素问·阴阳应象大论》："积阳为天，积阴为地"；"清阳为天，浊阴为地"。这些气一元论的思想，在我国传统哲学思想中有着深远的影响。

---

[1] 古人为观测日月五星的运行，在天空中确定了一些相对静止的恒星为背景标志。几个恒星联系起来组成一个图形，定出一个名称，成为一个参照星区，叫做一个"宿"或"舍"。我国古代对天象的观测以及历法的制定，都是以二十八宿为基础。二十八宿分别是：

东方七宿（苍龙）：角、亢、氐、房、心、尾、箕；

北方七宿（玄武）：斗、牛（牵牛）、女（须女或婺女）、虚、危、室（营室）、壁；

西方七宿（白虎）：奎、娄、胃、昴、毕、觜、参；

南方七宿（朱雀）：井（东井）、鬼（舆鬼）、柳、星（七星）、张、翼、轸。

[2] 十二次是以太阳每月在恒星间所处的方位与北极相连接，把周天分为十二等分，即十二次：星纪、玄枵（xiao）、诹訾、降娄、大梁、实沈、鹑首、鹑火、鹑尾、寿星、大火、析木。

先秦天文学和先秦诸子的各种宇宙观对中国音乐艺术的影响就是直接导致了中国音乐史上各种音乐自然观的产生。

2.5. 数学

远古时代的先民，在生活中已经注意到事物的数量与形状，但对数的概念还不是很清楚。到新石器时代中期，开始出现了刻划符号，可能就是数的起源[①]。在结绳和刻划的基础上，进而形成数目字。到奴隶社会初期的商代，数的概念形成。出土的甲骨文中有许多数目字，其中最大的数目字已经达到“三万”。商代至少应有加法、减法和乘法运算，只是由于甲骨文不能记载算法和运算过程而没有明确的记载。周代以后有了运算的记载。战国时期已经有了减法、乘法和除法，甚至出现了负数的萌芽。

春秋战国时代的文献中有了关于乘法口诀的不完全的记载及分数概念。《考工记》中记载了由于制造各种器具和器具规格的需要而大量使用了分数，特别是有了分数运算；《管子·地员》关于三分损益法的记载“先主一，而四指三开，以合九九”，相当于 $1\times3^4=9\times9=81$，这已有了指数的初步观念。

几何的起源，在我国萌芽于旧石器时代。从考古出土的这一时期的石器形状中，反映出原始社会随着社会生产的发展，人们逐渐有了平面、球、圆、柱、锥、平行、垂直等许多初等几何观念，这是几何在我国萌芽的一种表现。春秋时期，已经相继产生了正方形、长方形、三角形、梯形、圆等的面积计算法。

这些数学计算技术和几何概念的发展，促成了音乐史上律学计算公式、计算规律的提出，并且对当时乐器的形制和发声原理产生了重要的影响。

2.6. 物理学

力学是研究宏观物体机械运动规律的一门学科，也是最古老的学科之一。力学知识的出现是从生产与生活实践中积累的。石器的制造和利用本身就是力学知识的运用。新石器时代的先民把石斧、石凿、石铲、石锛等工具制成背厚刃薄、表面磨制光滑、平整的形体，符合尖劈越尖、效率越大、越省力的道理，人们从中逐渐增加了对物品的物理和机械性能的知识。春秋战国时期，我国古代力学已进入形成时期，表现出两种发展趋向：一是以《考工记》为代表的实用力学知识的积累，如物体的滚动，箭矢的飞行，物体的沉浮等现象的知识；一是以《墨经》为代表的理性力学的萌芽，如时空与运动、力与重、重心和平衡、简单机械原理等方面带有理论性的粗浅概括。古代力学由经验的积累向理性的概括过渡，达到了初步形成的阶段，为中国后世力学奠定了一个良好的基础。

春秋战国时期，人们对物体的振动和发声的关系，各种质料和形态的物体所发声音的响度与音色，声音的共鸣现象等，已有了较清楚的了解和详细的记载，随着音乐娱乐活动的日益兴盛，创立了我国古代律学的基础。古人积累的乐器声学的经验、对共振现象、共鸣现象的研究对中国的先秦音乐的影响自然是不言而喻的。

[①] 殷玮璋 曹淑琴 《中国远古暨三代科技史》，人民出版社，1994，第 62 页

二 先秦时期音乐科技文献史料与考古实证材料

要研究先秦时期音乐科技的发展，史料的考证是工作的前提和基础。因此要对相关的音乐文献及考古材料作尽可能完整的考证。下面我们就从先秦时期及汉代的音乐科技文献史料和考古出土的实证材料两个方面，对先秦时期的音乐科技发展的具体高度和水平进行考察。

1.音乐科技文献史料

先秦时期的音乐科技史料大多集中在以下几部书籍中：

(1)《尚书》

从《虞夏书·舜典》的记载看，上古时代中国曾经有过一次最早的统一度量衡和统一标准音高的工作，以黄钟律管来校正度量衡，即中国历史上的“同律度量衡”的命题：黄钟律管的长度是长度单位的起源，黄钟律管的容量是容量单位的起源，黄钟律管所容黍的重量是重量单位的起源。（史料见附录1—1）

(2)《周礼》

《周礼》中的音乐科技史料有两处：《春官·宗伯》及《冬官·考工记》。春官·宗伯》记载了“典同”辨别天地四方的阴阳之声以制作各种乐器。《考工记》对钟的各部名称予以规范，对钟的各部分尺寸比例做了规定，最后提出钟的音质与钟壁的厚薄、口径的大小、钟甬的长短有关。并且中详细记录了当时工匠造磬的规格与如何对磬进行调音。这些记载是古人所累积的乐器声学经验的理论总结。（史料见附录1—2）

(3)《礼记》

《礼记》中的音乐科技史料有《月令》。在《月令》中，许多东西都与五行相联系：五色（青、赤、黄、白、黑）、天干（甲乙、丙丁、戊己、庚辛、壬癸）、五虫（鳞、羽、毛、介、倮）、五脏（脾、肺、心、肝、肾）、五味（酸、苦、甘、辛、咸）、五数（八、七、五、九、六）十二律及五音都与五行（木火土金水）相对应。《月令》体现了阴阳五行理论的“天人感应”效应。（史料见附录1—3）

(4)《左传》

《左传》中的史料有《昭公元年》、《昭公二十五年》，主要是记载古人的各种自然音乐观。其中《昭公元年》记述了秦国医生医和关于音乐的言论，其主要观点是：“天有六气，降生五味，发为五色，征为五声，淫生六疾。”这是他的“六气”音乐观。《昭公二十五年》载有郑国执政上卿“六气五行”音乐观，子产认为天地是客观存在的物质世界，他把六种无形的自然之气归属于天，把五种有形的基本物质元素归属于地，而客观存在着的物质世界包括音乐就是源自“六气”、“五行”的。这是一种朴素唯物主义的自然观。（史料见附录1—4）

(5)《国语》

《周语上》中的记载主要是讲虢文公的“阴阳音律观”，周人认为春季和协风的产生，是由于阴消阳长而致阳气充满上升的缘故，认为音律和决定季节及季节之风的阴阳之间有

密切的关系；《周语下》讲到了周景王的乐官伶州鸠的“天道音律观”：伶州鸠认为由于阴阳二气的有规律的变动流转，产生了三月一季和四季一年十二月，以十二律比附十二月，以三度生律法比附一季三月的划分。伶州鸠还明确提到“律所以立均出度”，说明律和校正钟音高低的均及计量基元的关系，这在我国古代乐律学史和度量衡史上具有重要的历史意义。《郑语》记录了公元前八世纪周幽王太史史伯的“五行音乐观”，史伯认为“五行”是构成“百物”的五中基本物质元素，音乐的构成也要遵循杂“五行”以成“百物”的规律，音乐是由“六律”依照“和”的规律而构成的矛盾统一体。（史料见附录 1－5）

(6)《管子》

《管子》的音乐科技史料主要集中在《幼官》和《地员》两篇中。与《礼记·月令》相似，《幼官》一篇中，社会政治、经济、军事、农业、人伦、仪礼、音乐、自然现象、人的生老病死、新陈代谢都与四时、五行相配。《地员》是战国时期有关生态地植物学的一篇著作，认为华夏九州土质各不相同，从而导致了各地音乐风格的差异；并以五音测定大平原五种土壤的井水深度（地下水位）；《地员》还对宫商角徵羽五声的听觉美观效应进行了抽象的概括，用家畜鸣叫声来类比五声，足见先秦时期，我国先民对乐音音乐已基本有了相对稳定的认识。此外，在《地员》篇中还有我国音乐史上最早的关于三分损益法计算的记载。这些可以说是中国古代阴阳五行理论对古代音乐思想影响作用的体现。（史料见附录 1－6）

(7)《庄子》

《庄子》中的《徐无鬼》记载了古人在调瑟时发生的共振现象。这段记载既描述了基音的共振现象，也描述了基音和泛音的共振现象。（史料见附录 1－7）同样的记载还见于《淮南鸿烈·览冥训》、《淮南鸿烈·齐俗训》。（史料见附录 1－17）

(8)《晏子春秋》

《晏子春秋·内篇杂下第六》讲到乐师开根据五音配五行的说法，认为属于东方的声音短促，属于西方的声音悠扬，以此来判断景公新建的柏寝之台方向不正。（史料见附录 1-8）

(9)《韩非子》

《韩非子》一书中的《外储说左下》：“小弦大声，大声小弦”的记载，表明当时古人已经从经验上懂得了细弦高声，粗弦低声的道理。（史料见附录 1-9）

(10)《吕氏春秋》

《吕氏春秋》中的音乐科技史料有《大乐》、《古乐》、《音律》、《应同》四篇。《大乐》篇：“音乐之所由来者远矣。生于度量；本于太一。”体现了古人朴素的自然音乐观。；《古乐》中“黄帝令伶伦作为律”的传说，记录了古代“律”起源的过程；《音律》篇详细记录了三分损益法及其生十二律的次序；《应同》篇提到声律属于比数的音互相应合，这是属于共振现象的记载，类似的记载还见于《春秋繁露》（史料见附录 1-12）；《圜道》讲，五声音阶的各音级是按照一定的生律法确定的，所以互相协调，互不干扰，表明古人对音阶已经有了合乎音乐声学的一定认识。（史料见附录 1-10）

(11)《韩诗外传》

其中有关于赵王与其使者的一段对话，说明当时人们已经认识到天气的燥湿会影响弦线的张力，进而影响音高，这是古人对于乐器弦线振动的认识。（史料见附录 1-11）

2. 音乐考古实证材料

音乐是一种随唱奏而随即消逝的“时间的艺术”，现代人已经无法听到商、周时期的音乐。除了文字所能留给我们的珍贵资料以外，我们能得到音乐历史真实的另外一种途径就是出土乐器。先秦时期的乐器仅见于《诗经》的就有近三十余种，在周代的文献中，乐器被分为八类，即金、石、土、革、丝、木、匏、竹，称为“八音”。而到目前为止，我们所能见到的出土乐器主要还是陶土的埙（土）、石器的磬（石）和铜铸的钟（金）三种[①]。由于某些原因，这些乐器所体现的音乐科技的材料没有体现在先秦的文献中。从这些出土的乐器，我们可以观测其中所包含的物理声学、材料工艺学、数学、金属冶炼技术等科学技术的发展水平。

2.1 贾湖骨笛

图一 骨笛（M282：21，20），河南舞阳贾湖出土，上长23.6厘米，下长22.2厘米

1987年至2001年间在河南舞阳贾湖村裴李岗文化遗址内，考古发现了近30余支骨质的吹管乐器[②]。这些骨笛两端直通，均采用猛禽腿骨去掉两头关节制成，两端都可当作吹口。管身大多数设有四至七个不等的发音孔。其中M341：1号骨笛出自贾湖遗址的早期墓葬M341，全长20.9厘米，五孔，完整，通体呈棕色，两端骨头节被完全锯掉，两端近切割面均见有刻痕，锯前似经过设计，通体把握光滑，钻孔前经过设计，第四、第五孔一侧见有刻痕，第一、二、三孔旁边有划痕。音孔均很圆，孔壁稍有倾斜，上大下小，外径大于内径，由此可以推测，该骨笛的开孔系尖锐钻头自外向内回旋钻进而成。音孔排列基本呈一直线[③]。 M282：20号骨笛（图一下）管体全长22.2厘米，曾经过精细磨制，斜吹管口边棱发音[④]。在管壁一侧钻有一纵列七个直径3.6毫米的圆形指孔，在第一指孔左上方还钻有一个直径1.58毫米的小指孔，用来调节按孔音高偏差[①]。2001年在贾湖遗址墓葬M511出土的M511：4号骨笛[②]，管身长24.5厘米，通体棕色，把握光滑。两端均有骨关节残存，当为制作是照顾一定长度所留。管身钻有7个音孔，孔较圆，外径略大于内径。每个音孔旁均有刻划痕迹，在孔最大直径处，只见一次刻记，说明钻孔完全按照一次刻记施钻，没有二次调整。在骨笛背孔面，距吹口端6.89厘米处有一横向刻痕[③]。

目前有关贾湖骨笛的研究成果有：《考古新发现——贾湖骨笛》（张居中，《音乐研究》1988年第4期）、《河南舞阳贾湖新石器时代遗址第二至六次发掘简报》（河南省文物研究所，《文物》，1989年第1期）、《舞阳贾湖骨笛的测音研究》（黄翔鹏，《文物》，1989年第1期）、《贾湖龟铃骨笛与中国音乐文明之源》（吴钊，《文物》，1991年第3期）、《舞阳贾湖骨笛的音孔设计与宫调特点》（童忠良，《中国音乐学》，1992年第3期）、《笛乎 篪乎 龠

[①] 黄翔鹏，《溯流探源——中国传统音乐研究》，人民音乐出版社，1993，第5页
[②] 章 俊，《亲历新出土的的测音》，《人民音乐》，2002.11
[③] 萧兴华，《中国音乐文化文明九千年——试论河南舞阳贾湖骨笛的发掘及其意义》，《音乐研究》，2000.3
[④] 李纯一，《中国上古出土乐器综论》，文物出版社，1996，第359页
[①] 吴钊，《追寻逝去的音乐踪迹》，东方出版社，1999，第5页
[②] 徐飞、夏季、王昌燧，《贾湖骨笛音乐声学特性的新探索》，《音乐研究》，2004.3
[③] 徐飞、夏季、王昌燧，《贾湖骨笛音乐声学特性的新探索》，《音乐研究》，2004.3

乎——为贾湖遗址出土的骨质斜吹乐管考名》（刘正国，《音乐研究》，1996 年第 3 期）《舞阳贾湖骨笛研究》（陈其翔，《音乐艺术》，1999 年第 4 期）、《中国音乐文化文明九千年——试论河南舞阳贾湖骨笛的发掘及其意义》（箫兴华，《音乐研究》，2000 年第 3 期）《贾湖出土骨笛及相关问题》（王丽芬，《考古与文物》，2002 年第 4 期）、《亲历新出土的的测音》（章俊，《人民音乐》，2002 年第 11 期）、《关于贾湖骨笛测音数据及相关论证问题的讨论》（郑祖襄，《中国音乐学》，2003 年第 3 期）、《贾湖骨笛音乐声学特性的新探索》（徐飞、夏季、王昌燧，《音乐研究》，2004 年第 3 期）。

归纳以上有关贾湖骨笛的论著，我们可以看到贾湖骨笛的音乐科技价值在于：通过贾湖骨笛我们可以观测到距今八千年前，我国古人对于律、音律的掌握高度及音律而推出的中国早期音阶的产生、发展过程。根据研究，贾湖骨笛可以依据形制和底层分为早、中、晚三期：

早期，距今九千多年至八千六百年左右，骨笛开有五孔、六孔，能奏出四声音阶和完备的五声音阶；

中期，距今八千六百至八千二百年左右，骨笛开有七孔，能奏出六声音阶和七声音阶；

晚期，距今八千二百至七千八百年左右，骨笛开有七孔和八孔，能奏出完备的七声音阶以及七声音阶以外的一些变化音。

根据我们所掌握的材料得知，贾湖骨笛是目前世界上出土年代最早、保存最为完整、出土个数最多、现在还能用以演奏的乐器实物[4]。上述三期骨笛不同音阶的存在表明，早在距今 9000 年前，贾湖人已经有了初步的音阶观念，他们能够靠直觉把握将音列中音与音的关系进行有规律的选择和排列，并用不同的音程关系构成各种音阶的知识[5]。虽然目前的材料还不允许我们做出贾湖人对“律”已有明确概念的推论，但在他们的艺术实践中，从音程的音分关系看，已具有纯律、五度律和十二平均律的因素。在长期的艺术实践和选择中，这三种律制在不同时期对中国人的音乐生活都产生了制约性的影响[6]。

2.2 埙

埙是新石器时代和商周考古中发现的一种气鸣吹奏乐器，其形制为有底、中空的罐体。埙基本都是陶制品，商代晚期有个别埙用石料和兽骨制成（见图七）。

图二　山西荆村无音孔埙，高 5.4 厘米

图三　西安半坡一音孔埙

图四　山西襄汾陶寺遗址采集的陶寺类型埙

图五　甘肃火烧沟四坝文化鱼形埙

图六　河南郑州二里岗上层兔埙

图七　安阳西北岗 M1001 大墓兽面纹骨埙

图八　河南郑州二里岗上层兽埙

早期的陶埙只有吹孔，没有音孔，如山西荆村出土的无音孔埙（见图二）。后出现了一

---

[4] 张居中等，《舞阳贾湖》（下），科学出版社，1999 年，第 992 页。

[5] 黄厚明、陈云海，《中国史前音乐文化状况初探》，中原文物，2002，3

[6] 黄厚明、陈云海，《中国史前音乐文化状况初探》，中原文物，2002，3

音孔陶埙，陕西西安半坡遗址出土的仰韶文化半坡类型的埙（见图三），细泥红陶制成，手制，形状略似橄核，内实，体中有一开口于上下两端的“∧”形管腔。上端为吹孔，下端为指孔。经测定，能发相距小三度的二音[①]。半坡埙以后，新时期时代晚期，埙从一音孔发展到两音孔，例如山西襄汾陶寺遗址采集的陶寺类型埙（见图四），手制，略似平底卵形，腰部偏上处开两个并列的圆指孔。高4.4厘米，腹径2—3.1厘米。经测定，能发音质较好的三音[②]。 从新石器时代晚期到商的早期，陶埙已由二音孔发展到三音孔。甘肃玉门火烧沟遗址出土的随葬品和采集品，共二十多件，多为红陶和彩陶，手制，扁卵形，中空，顶端有圆形吹孔，两肩和前腹左下侧各有一圆形指孔，底端有扁尾，形似鲳鱼。大多数在尾上设一或两个穿孔，少数是在吹孔两侧设两个穿孔，以备穿绳悬挂之用。有的通体无饰，有的则施以彩绘网纹。到商代早期埙有平底卵形、扁卵形和兽形，指孔为1—3个。晚期为平底卵形，前面三个、后面两个指孔，质料多为泥质陶，极少数为石或兽骨。河南安阳殷墟小屯妇好墓出土的殷墟文化二期商埙，五音孔，高9.2厘米，腹径4.5厘米，泥质黑陶，表面磨光。前后面腹中下部各有三和二个大小不等的圆形指孔，顶端有一圆形吹孔，经测音可以发大九度内的十二个音[③]。

关于埙，目前的研究成果有：《西安半坡》（中国社会科学院考古研究所等，文物出版社，1963年）、《原始时代和商代陶埙》（李纯一，《考古学报》，1964.1）、《从原始氏族社会到殷代的几种陶埙探索我国五声音阶的形成年代》（吕骥，《文物》1978年第10期）、《贾湖骨笛在音乐史上的重大价值》（罗桃香、赵世纲，《中国文物报》，1988.6.17）、《先商和商代埙的类型与音列》（方建军，《中国音乐学》1988年第4期）、《考古新发现——贾湖骨笛》（张居中，《音乐研究》，1988.4）、《新石器时代和夏商时代埙的形制演变及其音阶构成》（方建军，《中国艺术研究院研究生部学刊》，1988年第1期）、《中国原始艺术》（吴诗池，紫禁城出版社，1996年）。

从形制上远古和商周时代的埙可分为圆腹和扁腹二式：

圆腹式：埙的腹腔略呈圆形，底部有尖底、圆底和小平底之分；

扁腹式：埙的腹腔较扁，外形似扁壶。

按时期可把远古和商周时代的埙分为三期[①]：

第一期，时代相当于仰韶文化和龙山文化之间，按孔在两个以内。此期埙形制不甚规整，由捏制向手制发展。

第二期，时代在二里头文化和二里岗文化之间，按孔增加在4个以内，此期埙形制渐趋规整，多手制，有的表面磨光。

第三期，时代在殷墟文化和东周之间，按孔都是5个。此期盛行以殷墟文化为代表的圆腹小平底埙，形制规范，开始使用模制法制埙。有的埙体表还有纹饰或铭文。这一期的埙规格一致，型式统一，在殷墟文化时期已发展到了定型阶段，之后，这种式样的埙便被周代的埙沿袭下来。

从目前考古出土的情况看，黄河流域的埙在考古学文化上基本呈序列发现，从仰韶文

---

① 李纯一，《中国上古出土乐器综论》，文物出版社，1996，第389页
② 李纯一，《中国上古出土乐器综论》，文物出版社，1994，第389页
③ 李纯一，《中国上古出土乐器综论》，文物出版社，1994，第400页
① 方建军，《中国古代乐器概论》，陕西人民出版社，1996，第137页

化、庙底沟二期文化、龙山文化、二里头文化、二里岗文化到殷墟文化，埙的发展连绵不断。从半坡的一音孔埙到山西的二音孔埙，从甘肃的三音孔埙到小屯武丁时期的五音孔埙，为我国古代音阶的发展提供了实物证明。

陕西半坡一音孔埙可吹出一个小三度音程，它为我们保存了距今六千七百年左右的、已知的“最早的”一种音阶形式[②]。山西襄汾陶寺遗址的两个二音孔埙能吹出三个音：角——羽——宫或者变宫——角——徵，构成一个纯四度和小三度音程。甘肃火烧沟出土三孔陶埙能吹出四个音，如果采用西周以来的“阶名”加以认识，具有“宫——角——徵——羽”的音阶结构，少数出现了“清角”，但缺少“商”音[③]。安阳小屯殷墓出土的五音孔商埙则在陶埙音阶的发展过程中达到了一个音列最完备的程度——已经在十一个音之间构成了半音关系，只差一个音就能凑全“十二律”。这表明完整的七声音阶至迟在晚商时期已经形成，而且变宫、清角“二变”的出现不一定晚于五声，晚商的音乐中已经有若干变化音可供使用，由此可以推断我国音乐中五声音阶和七声音阶有一个长期并存的传统，而不只是一个五声向七声过渡的形态[④]。在我国音阶发展史上，这些研究成果无疑具有开创性的意义。

可以看出，埙作为研究先秦音乐文化的一件重要的乐器，它的音乐科技的价值在于：

一是从目前发现最早的河姆渡埙到商代的五音孔埙的发展历程中。我们可以观测到从远古到商周时期中国古人的陶器制作工艺水平的发展过程。新石器时代的埙手制而成，形制不甚规则，而在殷墟文化前期以圆腹小平底为特点的埙的形制发展到了定型阶段。埙的圆腹比扁腹气息容量达，发音丰润、后世，小平底便于置放。其按孔也有定制，前三后二。这种按孔的设计适合自然、放松的之法。利用磨制法可制作规格统一的同调埙，这是造埙技术的一大飞跃。

二是埙作为中国古代特有的旋律性乐器，它在原始社会产生，直至夏、商时期，在三、四千年的漫长岁月中本身作不间断的序列性发展。对埙的发展历史的研究我们可以了解到古人在音乐发展中音律从简单到复杂的创新过程。

2.3 钟与编钟

古代钟类乐器品种多样，不同品种的钟类乐器在发展过程中相互影响、相互渗透，形成了丰富多彩的青铜乐器文化。中国古代的种类乐器包括铃、甬、镛、鎛、甬钟、铎、钲、钮钟、錞于、句鑃、铙、扁甬钟[①]。

下面是 7 种主要钟体乐器的形制、奏法、性能和功用：

品种	形制特点	奏法	性能和功用
钲	体无枚，顶有长柄，或钮，柄上有穿、干、环，内壁无调音工艺	悬置击奏	单音军器
铎	体短小，顶有矮方銎以续木，体内一般有	一般为摇奏	单音军器

[②] 黄厚明、陈云海，《中国史前音乐文化状况初探》，《中原文物》，2002.3
[③] 黄翔鹏，《溯流探源》，人民音乐出版社，1993，第 10 页
[④] 黄翔鹏，《溯流探源》，人民音乐出版社，1993，第 14 页
[①] 方建军，《中国古代乐器概论》（远古—汉代），陕西人民出版社，1996，第 58 页

	舌，内壁无调音工艺		
句鑃	柄上一般无穿悬构造，内壁有调音工艺	插置击奏	双音旋律乐器
铙	形制似钲，长柄上无穿悬构造	手持击奏	单音军器
甬钟	有甬，体上一般有枚，内壁有调音工艺	侧悬击奏	双音旋律乐器
扁甬钟	形似甬钟，空甬有悬梁，体特扁（鼓间距离狭窄）	一般为直悬击奏	单音军器
钮钟	有钮，体上一般有枚，内壁有调音工艺	直悬击奏	双音旋律乐器

图九　　河南陕县庙底沟遗址出土的庙底沟类型的陶铃。

图十　　陶寺墓葬出土的陶寺类型晚期铜铃。

图十一　江西新干大洋州墓葬出土

图十二　克镈，陕西扶风任村出土。

图十三　云纹式甬钟，陕西宝鸡竹园沟出土

图十四　钮钟，山西闻喜上郭出土

图十五　河南温县殷铙

图十六　陕西扶风出土柞钟

图十七　曾侯乙编钟

目前关于钟铃类乐器的研究成果有:《随县曾侯乙墓编磬铭文释文》(湖北省博物馆,《音乐研究》，1981. 1)、《曾侯乙编钟音律的探讨》(王湘，《音乐研究》，1981. 1)、《曾侯乙编钟铭文考索》(李纯一，《音乐研究》，1981. 1)、《曾侯乙墓编钟的编次和乐悬》(李纯一，《音乐研究》，1985. 2)《曾侯乙青铜编钟》(麦克伦，《中国音乐学》，1986年第3期)、《两周铜镈综论》(方建军，《东南文化》，1994年第1期)、《先秦乐律的历史流变》(上、下)(崔宪，《黄钟》，1994年第1—2期)、《钟律与琴律》(崔宪，《中央音乐学院学报》，1995年第1期)、《音乐考古测音研究的误区——铜鼓“双音”及其“生律法倾向”、“律制”研究评析》(秦序，《中国音乐学》，1995年第1期)、《秦王编钟的复原研究》(谭维四、蒋朗蟾，《黄钟》，1996年第2期)、《研钟札记六则》(李纯一，《中国音乐学》，1996年第2期)、《曾侯乙编钟五音顺序钟道的意涵》(史新民，《黄钟》，1998年第3期)、《曾侯乙编钟的音乐文化基质》(方建军，《黄钟》，1998年第3期)、《曾侯乙编钟的悬法与旋宫》(应有勤，《黄钟》，1998年第3期)、《曾侯乙编钟复制的音律定位研究》(郑荣达，《黄钟》，1998年第3期)、《曾钟音列结构与长江文化区》(杨匡民，《黄钟》，1998年第3期)、《最近十多年来编钟的发现与研究》(王世民、蒋定穗，《黄钟》，1999年第3期)、《湖北出土先秦钟铃乐器概述》(李蔚，《黄钟》，1999年第3期)。

从体制来看先秦的钟类乐器，中原地区陶铃的椭圆体，是河南龙山文化中期至商周以来钟铃类乐器所广泛采用的，这种具有中华民族特色的合瓦体，是一个重要的发展。中国古代钟类乐器从铃开始，就形成了具有中华民族特色的“一钟双音”的合瓦形体制。从西周时期开始，先秦的钟内壁开始了隧，隧的作用是通过改变材料截面厚度来对音高进行微调。东周时期，钟的内壁发展成为有突起的弧形厚块，以起到调音的作用。东周晚期，钟体开始出现枚。枚作为钟体振动的负载，可以起到使钟的高次分音逐渐衰减的阻尼作用。

从原材料方面看来，陶寺类型晚期铜铃的出现是一个飞跃。因为以铜代陶，不但大大

提高了耐用性，而且大大改善了音质，为后世青铜钟镈的出现开辟了道路。

从商代开始出现了编钟，一般是三件一套。河南温县出土的一组殷铙（图十八），隧音与鼓旁音构成了五声音阶[①]。西周中晚期的甬钟已经形成规范化的制度，一般是八件一套，全部的音阶如同古文献的记载一样，避免了“商”音，而且同一钟的隧音与鼓旁音形成小三度的谐和关系（图十九，陕西柞钟）。到春秋时期，编钟的标准体制是九件一套，音阶的特点是在西周音阶的基础上增铸了“徵”、“商”并将其鼓旁音调成大三度，从而使全部乐音系列可以奏出七声或六声的音阶，但是还没有出现超过七声的其他变化音。

1987 年在湖北随县出土的曾侯乙编钟，共 64 件，按原编悬形式，分上、中、下三层排列。上层 19 口钟为“钮钟”，中、下层 46 件均为“甬钟”。编钟是用浑铸法铸成，并且熟练地采用了分范合铸技术。最大的甬钟使用的范和芯多大七、八十块。整套编钟铸造精美，花纹细质，钟体内很少有铸造缺陷。而且各个钟的口径大小、厚薄和甬的长短各不相同，这是按照不同音阶的需要设计制作的。编钟的音域共有五个八度，中心三个八度内半音齐全，全部音域中的基本骨干则是五声、六声以至七声的音阶结构[②]，已具备了旋宫转调的能力，能够演奏采用和声、复调以及转调手法的乐曲。曾侯乙钟铭共两千八百余字，可以分为标音铭文与乐律铭文两大类。乐律铭文列举了春秋战国之际楚、晋、周、齐等地和曾国本地各种律名、阶名、变化音名之间的对照情况，其中关于律高变化、音程变化、音域变化的用语，全都取前缀、后缀的形式与阶名或律名连用。了解曾侯乙编钟的全部标音体系，可以知道近代乐理中的所有大、小、增、减各种音程概念和八度位置的概念，早在两千四百余年之前，我国就有了自己的、民族的表达方法。曾侯乙编钟，完满地发展了编钟音阶，代表了先秦乐律学的最高成就，将钟、磬乐推进到了一个前所未有的高峰[③]。

中国古代的钟文化在先秦时期达到了后人无法企及的高度。以曾侯乙编钟为例，它的音乐科技不仅在于它代表了中国先秦乐律学的最高成就，而且还在于我们从曾侯乙编钟可以看到了中国古代青铜制造技术的发展水平。

2.4 磬与编磬

磬是一种石制板体击奏体鸣乐器。据文献记载和考古发现，磬的名称有：“石”、“磬”、“离磬”等。

图十八　陶寺 M3015 特磬，高 32 厘米，长 79 厘米，厚 1—1.5 厘米

图十九　陶寺 M3002 特磬

图二十　南安阳殷墟西区 M991 墓彩绘特磬，高 39.5 厘米，长 62.5 厘米，厚 3 厘米

图二十一　陕西扶风召陈西周编磬

图二十二　太原金胜村编磬（东周）

图二十三　曾侯乙编磬，战国早期，长 14-54.1 厘米，厚 1.3-3.1 厘米。

目前的研究论著：《湖北江陵发现的楚国彩绘石编磬及其相关问题》（湖北省博物馆，《考古》，1972 年 3）、《山西闻喜县发现龙山时期大石磬》（李裕群等，《考古与文物》，1986

① 黄翔鹏，《溯流探源》，人民音乐出版社，1994 年，第 101 页

② 黄翔鹏，《溯流探源》，人民音乐出版社，1993 年，第 67 页

③ 黄翔鹏，《溯流探源》，人民音乐出版社，1993 年，第 103 页

年第 2 期)、《周原出土的西周石磬》(罗西章,《考古与文物》,1987 年第期)、《曾侯乙墓编磬铭文初研》(李纯一,《音乐艺术》,1988 年第 1 期)、《考古发现先商磬初研》(方建军,《中国音乐学》,1989 年第 1 期)、《商代磬和西周磬》(方建军,《文博》,1989 年第 3 期)、《洛阳中州大渠出土编磬试探》(方建军,《考古》,1989 年第 9 期)。

考察目前考古出土的先秦磬的形制,我们可以发现迄今为止考古出土的新石器时代的磬均为单件特磬,可分为直顶、弧顶、折顶和倨顶四种类型[②]。

直顶型:磬的顶、底两边比较平直,无倨句;

折顶型:磬的顶边为折线形,倨句角度较大,股短阔,鼓狭长;

弧顶型:磬的顶边为弧形,无倨句;

倨顶型:磬的顶边为钝角,倨句,股、鼓分明。

商代磬可分为与新石器时代磬相同的四种类型,但各类型均有所发展变化且有中位悬孔与侧位悬孔之分。外形已经比较规整,而且在磬的表面开始出现了纹饰。(图二十)。

西周编磬在继承晚商编磬形制的基础上已基本定型为倨顶、底边平直和略微内凹的凸五边形。

东周时期的时期都是编磬,型式均为倨句,股鼓分明,底部是呈凹弧形的倨句型磬。

通过对一些不同时期出土石磬进行的测音工作,我们也可以对其音响情况做一了解:

新石器时代特磬属单音节奏性击乐器,但它在与其他乐器合奏时,音高应有一定的标准,只有在与乐曲调式主音音高相同时,才能增加乐曲的稳定性。

今保存较完整的商代的“永余”等 3 件一套的刻铭编磬(安阳殷墟一坑出土,故宫博物院藏品)的测音结果显示,“永啟”、“夭余”、“永余”这组编磬的发音听起来是三声徵调式和三声商调式,里面包含着大二度、小三度和纯四度的音程关系,可见此时的编磬已成为商代的旋律乐器。

西周编磬的组合数增加至 10 件一套。东周编磬的组合以 10 件和 13 件较为常见。河南洛阳中州大渠春秋晚期周墓出土的 10 件组合编磬,其测音结果显示这套编磬的音域在两个八度之内,且可构成五声宫调式音阶[①]。

湖北随县战国早期曾侯乙墓出土的曾侯乙编磬,一架 32 件磬,分上下两层编悬,每层 16 件。出土时已不能测音,但磬上刻有律名和阶名文字,可据以复原编磬的音响,结果显示:上下两层编磬的调高相差半音,分别属 B 调和 C 调。每层按徵、羽两种调式的骨干音编为左右两组。左右两组合用,则五声俱全,上下两层合用,具有十二个连续半音,当可进行能够较为广泛的转调[②]。

先秦时期,磬与钟一起奏响了音乐史上辉煌的“金石之乐”。从起初作为节奏性击乐器的特磬到后来可以构成五声、七声音阶的旋律性乐器,从中反映出先民们对音律认识的进步过程。此外,作为中国古代特有的“石”类乐器,磬的制造由粗笨取向精巧、钻孔的出现、磨制技术的应用,纹饰的出现,无不体现了先秦先民打制石器技术的进步。

2.5 摇响器

[②] 方建军,《中国古代乐器概论》(远古一汉代),陕西人民出版社,1996 年,第 45 页

[①] 方建军,《中国古代乐器概论》(远古一汉代),陕西人民出版社,1996,第 55 页

[②] 李纯一,《曾侯乙墓编磬铭文初研》,《音乐艺术》,1983 第 1 期

在中国新石器时代的考古发掘中，有一类陶制摇奏体鸣乐器，形状不一，一般为圆（椭圆）球体，中空，凭腔体和内装小丸相互碰撞发声。这种原始乐器，无文献记载，又不见于后世乐器中，遂有“陶球”、“响球”、“空心球”、“陶铃”、“陶响铃”及“陶响器”之名。本文从李纯一先生的观点，称之为“摇响器”。

图二十四　陕西临潼姜寨遗址出土的二期制品，高 5.8 厘米，直径 3 厘米，泥质红陶手制而成，形如橄榄，略扁，表面凹凸不平并无纹饰，中空，轻轻摇动会发出沉重的音响

图二十五　山西万荣荆村陶响铃

图二十六　四川大溪文化球形陶响铃，1974 年湖北松滋桂花树遗址出土的晚期制品，直径 3.6 厘米，细泥红陶，饰双股锥刺米字纹，有六个镂孔

图二十七　湖北京山朱家嘴陶响铃（屈家岭文化），1960 年京山朱家嘴遗址出土的前期制品，直径 3.5 厘米，细泥黑陶，体内装有豌豆大小的烧制陶丸十数粒，摇动作响。体表饰六个对称的三股锥刺篦点米字纹，米字纹中心交点上各有一个圆形镂孔，制作相当精良。

根据李纯一先生的研究，摇响器的形状有多种，但以球形最为常见。他根据形状对目前出土的摇响器进行了“临时性”的型式划分[③]：

<table>
<tr><td rowspan="12">摇响器</td><td rowspan="6">球形</td><td rowspan="3">无镂孔</td><td>素面</td></tr>
<tr><td>雕纹</td></tr>
<tr><td>绘纹</td></tr>
<tr><td rowspan="3">有镂孔</td><td>素面</td></tr>
<tr><td>雕纹</td></tr>
<tr><td>绘纹</td></tr>
<tr><td rowspan="2">半球形</td><td>有镂孔</td><td></td></tr>
<tr><td>有纽</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">椭球形</td><td>无镂孔</td><td></td></tr>
<tr><td>有镂孔</td><td></td></tr>
<tr><td>半椭球形</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>特性（其他形制）</td><td></td><td></td></tr>
</table>

摇响器在中国黄河流域地区和长江流域地区均有不少发现，其中以长江流域地区的大溪文化、屈家岭文化和薛家岗三期文化出土数量最多。

黄河中上游新石器时代晚期的摇响器出土数量不多，分属多种文化类型，包括姜寨二期、庙底沟类型、马家窑类型、马厂类型和齐家文化。目前出土的制品多用泥质陶制成，基本上都是球形，制作时都经过磨光。

目前所见大溪文化的摇响器都是空心球形，泥质红陶为主，加砂陶和黑陶少见。手制，且发展趋向于由大而小。纹饰以对称的米字纹为最常见，三角纹和经纹等较为少见。要素主要是篦点纹，其次是锥刺纹、划纹、凹槽纹和凹点纹，发展趋向是由繁而简；镂孔，或

③ 李纯一，《中国上古出土乐器综论》，文物出版社，1996，第 66 页

有或无，几乎全位于纹饰的交点上。

屈家岭文化摇响器（见图二十七）的特点是以泥质黑、灰陶为主的陶系和种种彩绘及刻划方格等纹饰，篦点米字、压划十字、三角等纹及凹点、镂孔的配置居于主导地位。

薛家岗文化是近年新发现的一种新石器时代晚期文化。该文化摇响器出土物主要见于第二期遗存中，形制上均为球形，泥质陶制品，皆为手制。薛家岗文化摇响器的特征表现在它的纹饰上。其纹饰大致可分为两种，一种是以三个大圆等分球面所构成的连续等边三角纹为主的几何纹，其独特之处在于在三角纹内所增加的种种精美的齿纹、篦点纹图案以及在镂孔外围所赠施的环纹；一种是混合配置的镂孔和凹点纹。

新石器时代没有文字，我们无法了解到当时人类对数的认识、对形的把握。但出土的这些空心陶球球面的纹饰、镂孔却为我们提供了可以参考的实例，以此可说明当时的人们对数与几何图形的认识已达到一定水平。

三 中国先秦时期音乐科技成就

通过前一部分对先秦音乐文献及考古材料的整理与归纳，我们可以在此基础上进一步探讨音乐科技取得的主要成果。先秦时期的音乐科技的成果具体体现在自然音乐观、音乐声学、音乐数学、音乐数学及乐器制造的材料工艺等方面。

1. 音乐中的自然科学观

《吕氏春秋·大乐》曰："音乐之所由来者远矣。生于度量，本于太一。"人类探索音乐与天文之间的关系几乎从音乐的起源之初就已经开始了。这种探索最初大概源于先民对宇宙的运行与音乐同样的协和有序的迷茫，由此拉开了中华文明揭示音乐与宇宙关系之奥秘的帷幕。

先秦时代的每一种学说或理论都是一个包罗万象的体系，都为宇宙的统一性立论，都认为自然界、人类社会以及人的思维有着统一的规律，产生于统一的宇宙本源，而关于宇宙本源及其发展、人类社会形成的理论，则是统一的阴阳五行学说。《周易·系辞》："太极生两仪，两仪生四象，四象生八卦。"两仪，即原始状态的天、地，包蕴金木水火土"五行"于自身，同时又兼阴阳二性。阴阳说用"阴气"和"阳气"的矛盾运动来解释自然现象。天气属阳气，性质是上升的；地气属阴气，性质是沉滞的。阴阳二气上下对流而生成万物，是天地秩序的根本原因，阴阳二气相互作用是所有自然万物变化的根源。阴阳四时变化，风雨雷霆相激，从而生成万物，包括自然界于人类社会。这既是一个矛盾斗争的过程，又是一个和谐顺畅的变化过程，矛盾与和谐源于合度。天地和谐，阴阳调和，社会协调安乐则产生音乐。人类、社会以及音乐是整个宇宙演化的结果，因此包纳宇宙演化过程中的一切规则、规律和特质。

先秦时期的先民对宇宙的本源与演化的认识，使得在关于音乐与天地自然之间的关系上存在一种普遍观念，即"天乐"观：乐音、音乐是天地自然的产物。《周礼·春官·典同》："掌六律六同之和，以辨天地四方阴阳之声，以为乐器。"《淮南子·主术训》称："乐生于音，音生于律，律生于风。此声之宗也。"当时可以称为"天乐观"的学说主要有以下几种：

1.1. 阴阳音律观

《国语·周语》记载了西周宣王时期（前 827－781 年）虢文公对于“阴阳音律观”的主要观点。立春时，在举行籍田礼和开始春耕的前五天，知晓风声的瞽会告知有协风（协风即和风）来。在举行籍田礼和开始春耕的当天，瞽还得率领音官省察土风，听测风气土气是否适宜于耕种。这一段记载说明周人认为春季和协风的产生，是由于阴消阳长而致阳气上升的缘故。根据瞽能知晓协风的来否及帅音官以音律省察风土和否二事看来，可知周人认为音律与决定季节及季节之风的阴阳之气有着密切的联系。

协风观念由来已久，商代就有四方神和四方风的信仰，而其中东方协风和虢文公所述完全相同。商代认为四方风有四神掌管，虢文公认为协风由阴阳二气的消长产生，前者是一种神秘主义，那么后者就当时一种朴素唯物主义①。

而这种理论的根源，现已难确知其祥，可能是古人由于长期的社会实践，逐渐意识到四时各有来自不同方向的四方之风，这些风各自具有不同的特点，如湿度、温度特别是强度的差异，表现为音高不同的风声，于是产生了用不同音高的乐音或音律来表示乃至测知四时四风的想法。

西周这种阴阳音律观对后世产生了深远的影响，东周阴阳五行学说中以五音、十二律配于四时、五行、十二月的观点即导源于此。

1.2 五行音乐观

五行音乐观的代表人物是公元前八世纪周幽王的太史史伯。史伯认为“百物”即一切事物都是由具有不同属性和作用的、有形体的土、金、木、水、火即“五行”配合而成。也就是说，“五行”是构成“百物”的五种基本物质元素。在五行中，土占重要地位，这可能是基于当时人们对土和人的生活的关系的认识而提出的。史伯已经初步地猜到了一些对立统一的规律②。他认为，一切事物都是由两种以上具有不同属性和作用而相互对立的“他”配合在一起，并得到均衡而形成的统一体——“和”，这是一切事物发展的规律。

史伯进一步认为，音乐的构成也要遵循杂“五行”以成“百物”的规律，应“去同而取和”。音乐应由属性、作用和音高不同的乐音构成，此即所谓“和六律以聪耳”。总之，音乐是由“六律”依照“和”的规律而构成的矛盾统一体。

1.3 “六气五行”礼乐观

《左传·昭公二十五年》载有郑国游吉转述过去执政上卿子产对于礼乐的看法（史料见附录 1－4）。子产认为天地是客观存在着的物质世界。他把六种无形的自然之气“六气”归属于天，把五种有形的基本物质元素“五行”归属于地，而客观存在着的物质世界都是源自“六气”、“五行”的。“六气”、“五行”的变化流转是“天之经”、“地之义”，是“天地之经纬”，是自然之“礼”，即天地本身所固有的秩序和规律。这显然是一种朴素唯物主

① 李纯一，《先秦音乐史》，人民音乐出版社，1994 年，第 85 页

② 李纯一，《先秦音乐史》，人民音乐出版社，1994，第 87 页

义的自然观。

1.4 “六气”音乐观

《左传·昭公元年（公元前 541 年）》载有秦国医生医和一段关于音乐的言论：“天有六气，降生五味，发为五色，征为五声”（史料见附录 1—4）。与《左传·昭公二十五年》中子产的“‘六气五行’礼乐观”相比较，医和的这段话是针对“六气”与“五行”的关系而言的。但是医和的这种唯物主义自然观比子产更为严格和深化：医和的“六气”和“五行”有着内在的联系，地的“五行”和它的属性相统一，而且和天的“六气”也是相统一的；“六气”的运动规律是“分为四时，序为五节”，不仅显示出时间与空间的统一，也显示出“四时”与“五节”的相互配列。

在这种自然观的基础上，医和建立起了他的音乐观：“五声”是“六气”赋予“五行”的一种属性，而“六气”的运动规律又表现为“五节”，所以由“五声”构成音乐，就应当仅仅使用与“五节”直接相对应的一组“中声”（“故有五节，迟速本末以相及，中声以降，五降之后，不容弹矣”）。这表明医和也是企图从自然界中寻求“五声”和音乐的根源。

1.5 “天道”音律观

周景王时期（公元前 544—前 521）的乐官伶州鸠认为十二律是本自“纪之以三，平之以六，成于十二”的“天道”，是指三个月为一季，四季十二个月成一年而言（史料见附录 1—5）[①]。伶州鸠在解释六律、六间时，主要是说阴阳二气，由于阴阳二气的对立统一和按周期有规律地变动流转，产生了三月一季和四季一年十二月。十二律就是效法这种阴阳之道即“天之道”，所以才有了三度生律法，由由阳六律和阴六间组成的十二律，以十二律比附十二月，以三度生律法比附一季三月的划分。伶州鸠企图从客观世界寻求十二律产生的根源，不失为一种朴素唯物主义。

十二律	黄钟	大吕	太簇	夹钟	姑冼	仲吕	蕤宾	林钟	夷则	南吕	无射	应钟
十二月	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
十二时辰	子	丑	寅	卯	辰	巳	午	未	申	酉	戍	亥

中国先秦时期有关“阴阳音律观”的学说种类众多，总起来看是建立在人类认识客观世界的朴素的唯物主义的认识基础之上的。这种音乐观来自于当时人们对自然科学整体的认识。人们运用这种自然观在音乐上提出了许多新的见解，这对于音乐的发展起过相当重大的有益的作用。当然这种“天人合一”的观念其真正的学术价值还有待于今后做更深入的研究。

[①] 王光祈曾对其生律法做过解释：先立黄钟、姑冼、夷则三律；然后再用太簇、蕤宾、无射三律将上述三律之间，加以平分，称为六律；最后又以大吕、夹钟、中吕、林钟、南吕、应钟六律介于上述六律之间，于是遂得十二律。见王光祈《中国音乐史》上册，中华书局，1934 年，第 24 页

2. 音乐声学

音乐声学是采用物理声学理论和方法探索音乐产生及传播规律的一个学科。它是伴随着音乐的发生而产生的，是研究一切声音现象的学科。古时说“诗言志，歌咏言”，诗歌是感情发于中的自然流露，它们的产生似乎应在文字产生之前。有了诗歌，包括各种器乐在内的声乐系统就会逐渐建立起来。大约在管弦乐器产生后，有了十二律之说，音律学逐渐发展起来。至迟在周朝时就已经有了五声、八音之说。春秋战国时期，随着生产力的提高、物质文化的发展，音乐成了一门专学，《周礼》六艺“乐”就是其中之一。声学理论就是在这种情况下发展起来的。战国时期科学技术特别是乐器制造工业的发展，促进了音乐声学的发展。

中国古代的声学，从振动波的概念到实践中的应用，从乐器制造的发展到音律学的进步，都有突出的成就。

2.1 乐器声学

我国古人很早就已经认识到音的高低与发音物体本身的性质、结构、形状等有关，用现代语言说就是与发声物体的固有频率有关。而固有频率是由物体本身的性质结构、形状等决定的。通过改变物体的形状、结构，可以改变它的固有频率。

先秦先民已经可以利用声学的原理来制造乐器，在制造乐器当中，已经注意到了管、板、弦等不同材料的发声原理的差别。

在河南舞阳出土的一批骨笛中，有的骨笛七个指孔都位于一条垂直刻线与七条短横刻线的交点上，可见这些指孔都是事先设定的，并非随意安排的。在骨笛 M282：21 管身上，我们可以看到，除七个按孔之外，在第一按孔左上方还钻有一个直径 1.58 毫米的小按孔（见图二），当是针对第一指孔音偏低而采取的补救措施[①]。M341：2 号骨笛两端开口管径分别为 Ø0.72 厘米×Ø0.9 厘米、Ø0.85 厘米×Ø1.1 厘米[②]，整个骨管中间略细，两端略粗，骨管的内径为不规则形内腔。整个管身共有 6 个按音孔。这 6 个按音孔之间有 5 个间距，其中 1—2 孔、5—6 孔间距为 1.90 厘米，2—3 孔、3—4 孔的间距为 1.85 厘米，4—5 孔之间为 1.95 厘米。从声学角度讲，管子的管长、管径、孔位、孔径等任何一项的改变都可能影响它的音高。一般来讲，管越长，管内径越大，基音（筒音）频率越低；反之，基音频率就越高。在基础音确定后，就要开按孔以发出所需音阶的相对音高。M341：2 号骨笛 5 个间距出现的 3 种不同数据，说明贾湖人能够利用不等长的孔距，来适应骨管内径的粗细变化来确定开孔的位置，从而得到自己满意的音高。

从贾湖骨笛的制作水平看，当时贾湖人已经能把自己对音的高度感觉和对管的长度及其变化的、不规则形的管内径粗细变化加以综合考虑和计算，并在无数的制作骨笛和开孔的实践中找到自己在骨管上需要的音高排列，制造出世界上第一只最精确的乐器[③]。

春秋战国时期的《考工记》中记载：

[①] 李纯一，《中国上古出土乐器综论》，文物出版社，1996，第 359 页
[②] 萧兴华，《中国音乐文化文明九千年——试论河南舞阳贾湖骨笛的发掘及其意义》，《音乐研究》，2000.3
[③] 萧兴华，《中国音乐文化文明九千年——试论河南舞阳贾湖骨笛的发掘及其意义》，《音乐研究》，2000.3

“凫氏为钟……薄厚之所震动，清浊之所由出。侈弇之所由兴，有说。钟已厚则石，已薄则播，侈则柞，弇则郁，长甬则震。是故大钟十分其鼓间，以其一为之厚；小钟十分其钲间，以其一为之厚。钟大而短，则其声疾而短闻；钟小而长，则其声舒而远闻。”

……

“磬氏为磬。倨句一矩有半。其博为一，股为二，鼓为三。参分其股博。去一以为鼓博。参分其鼓博，以其一为之厚。已上则摩其旁，已下则摩其端。”

声音的清浊是由薄厚不同的钟的振动产生的。所谓“清浊”指的是音调，音调的高低决定了振动的频率，钟体的薄厚影响到声波的振动。凫人已经掌握了钟发声的高低与钟体的薄厚有关。从目前已出土的钟类乐器中，我们可以看到在钟体内壁不同长度、不同深浅的隧，还有突起的弧形厚块，这些都可以对钟的音高起到微调作用。

同样，“磬人”也从自己的生产实践中认识到“凡乐器，厚则声清，薄则声浊”。从声学原理上讲，钟与磬的振动都是板振动，而板振动的频率与板的厚度成正比。声音太高时，就磨磬的两面，使之变薄，振动频率变低，声音就降至正常；声音太低时就磨其两端，使磬体相对变厚，声音就升高至正常的要求。

值得注意的是，中国古代的乐钟都铸成像两片瓦合在一起的样子，这是为了防止它发出的音波相互干扰。钟的振动类似板振动，圆形板面振动的连续性比其他任何形状的振动连续性都要强，加上圆钟受击以后里面的空气涡流发生迂回作用，因而在钟口形成的空气的压缩和延续的时间较长。这样，一方面听到的声音比较长，另一方面，在快速旋律钟，声波就相互叠加和干扰，不成音律。而古代乐钟的合瓦形结构使之能同时存在两个互为抑制的振动模式，从演奏效果看，避免了音波相互干扰的问题。在此振动模式基础上，钟匠对钟的内壁做精心锉磨、调音，就能实现一个钟体上发出两个相距为三度音程关系的乐音，这就是中国特有的“一钟双音”现象。

关于弦线振动的规律，《韩非子·外储说左下》有这样一条记载：“（齐宣王）又问：‘儒者鼓瑟乎？‘（匡倩）对曰：‘不也。夫瑟以小弦为大声，以大弦为小声，是大小易序，贵贱易位。’”当时已从经验上懂得小（细）弦大（高）声，大（粗）弦小（低）声的道理，已经知道了弦线和音调的定量关系。这和近代声学所说的弦线的振动频率与弦线的平方根成反比的道理是相符合的。《韩诗外传》中赵王与其使者一段对话，则显示先秦时期，我国古人已经懂得弦乐器的音调是由弦线的长度、张力等因素共同决定的道理。

春秋战国的古籍中，对物体发声和传播中的一些物理现象，如音调的响度、音品和共振等，都有所记载。

《周礼·春官宗伯第三》：凡声，高声石昆，正声缓，下生肆，陂声散，险声敛，达声赢，微生韽，回声衍，侈声筰，弇声郁，薄声甄，厚声石。凡为乐器，以十有二律为之度数，以十有二声为之齐量。凡和乐亦如之。

《考工记·凫氏》篇载：“钟大而短，则其声疾而短闻；钟小而长，则其声舒而远闻”；“钟已厚则石，已薄则播，侈则柞，弇则郁，……”。

《考工记·韗人》篇载：“鼓大而短，则其声疾而短闻。鼓小而长，则其声舒而远闻。”

响度指人的听觉所辨别的物体发声的强弱，它与声源的振幅有关。这里讲的就是钟的形状与响度、传播距离的关系。大而短的钟，振动的振幅小，响度（声强）小，单位时间内传出的能量少，故传播的距离也小；小而长的钟，小而长的钟，响度大，能远闻。而且

钟口的张宽和收敛也影响的音质。钟体太厚生硬就不响，太薄就声散，钟口张宽声音就不悦耳，钟口收敛声音就闷。

音品指各种物体所发声音的特性，用现代声学理论讲，即具有不同的频谱，也称为音色。春秋战国时期人们对不同物体的音品已有初步的认识。

《礼记》中称："钟声锵，……石声磬，……丝声哀，……竹声滥，……鼓鼙之声灌，……。"这是古人对不同物体音色的最早描述。

关于物体的共振和声音的共鸣现象，在古籍中也早有记载。所谓共振是指一个物体振动的时候另一个物体也随之振动的现象。发生共振的二物体，它们的固有频率一定相同或成简单的整数比。发声的共振现象叫共鸣。这在《庄子》及《吕氏春秋》中都有记载。

《庄子·徐无鬼》中记载，庄周对惠施讲过，西周初年的鲁遽演示过瑟弦的共振现象："鲁遽……于是为之调瑟，废一于堂，废一于室，鼓宫宫动，鼓角角动，音律同矣。夫或改调一弦，于五音无当也，鼓之，二十五弦皆动，……"

这段记载可以说是世界上最早的一个共振试验。分别放在堂屋和居室的两具瑟，在其一上弹奏出宫音和角音时，另一具上相应的弦就发出共振，这是基音的共振现象；若改调一弦使之与任何一音皆不合，它发出的声音，除基音之外还有若干泛音组成，若泛音的数量很多，分别与瑟上的 25 根弦的固有频率相等，那么当弹奏它时另一瑟上的二十五根弦皆振动，这是基音和泛音的共振现象。

《吕氏春秋·应同（有始览·二曰)》中也讲到："类同相召，气同则合，声比则应。鼓宫而宫动，鼓角而角动。

意思是说：种类相同的互相感召，气味相同的互相结合，声律属于比数的互相应合。鼓动宫音而所有的宫音都振动，鼓动角音而所有的角音都振动。"声比"二字既包含了基音之间（频率为 1 比 1）的共振，也包含了泛音之间（频率为整数比）的共振。

2.2. 律学

"律"是构成律制的基本单位。当各律在高度上作精密的规定，形成一种体系时，就称为"律制"。"律学"是对乐制作系统、全面的研究。详细的说，律学就是对构成乐制的各音，依据"声学"原理、运用数学方法来研究各音之间相互关系的一门科学①。

律学的基础在于人类对音高——一定频率的乐音——的认识。《虞书·舜典》、《吕氏春秋·古乐》等关于新石器时代神话传说的记载中反映出中国古人对音高规律的认识。"击石拊石"的传说有夏、商石磬作为物证。山西夏县和襄汾的陶寺出土的新石器时代粗制石磬和河南出土的商代虎纹大石磬，测音均在＃C^1左右，说明夏、商人已经有了绝对音高概念。

据古籍记载，中国很早已出现五声音阶、七声音阶和十二律。五声之名至迟在春秋战国时期（前 770－前 221 年）已经出现。在《国语·周语》（约公元前 5 世纪）所载的前 522 年乐官伶州鸠答周景王的问话中就提到了宫、角、羽三个声名、十二律的律名及"七律"。

关于十二律的起源，《吕氏春秋·古乐》记载了公元前两千多年前，黄帝命乐官伶伦作律。伶伦在昆仑山边取竹节，按凤凰的鸣叫声制十二律，并以两节间长度为三寸九分的竹筒作为"黄钟之宫"的标准高度。伶伦作十二律之说，含有夸张成分，但这个传说本身说

① 缪天瑞，《律学》，人民音乐出版社，1999，第 1 页

明了上古时期的中国人已经认识到：乐音的高度可以用律管来记录和保存，而且可以用一定的长度的律管来制定音阶的标准音。中国古代的历代王朝就是用律管的形式来制定和颁发“黄钟”（C）律标准高度的。

律管是一端为吹口的开口管，中间无音孔。为了确定黄钟音律管的不变性，古代人规定了管长、口径和内周之长。根据声波波长与频率成反比的原理可知，在口径一致的条件下，律管越长，声波越长，频率振动越慢，音调也越低，也就是说，在口径不变的条件下能吹出黄钟律的律管，其管长是一致的，管内的容积也是一定的。由于确定律管发音的高低不仅要确定管长，而且还要精确地测定管的横截面和容积。这就决定了古代乐律学与度量衡的密切关系。

律管的传说导出了古时的“同律度量衡”学说。这是中国历史上一个非常古老的命题，语出《尚书·虞书·舜典》。所谓“度”者，指物体的长度，分、寸、尺、丈、引也。其中基本单位“分”即由黄钟所出：标注黄钟管容黍 1200 粒，其每一粒之广为一分；十分为寸；十寸为尺；十尺为丈；十丈为引。所谓“量”者，指物体的体积或容积，龠、合、升、斗、斛也。黄钟管容黍 1200 为一龠；两龠为一合；十合为一升；十升为一斗；十斗为一斛。所谓“衡”者，指物体的重量，铢、两、斤、钧、石也。黄钟管容黍 1200 粒为十二铢；二十四铢为一两；十六两为一斤；三十斤为一钧；四钧为一石。这一学说把“律”置于首位，因为律管本身有长度，管内有容积，管钟所鳖之物又有重量，故“律”实际上包含了度、量、衡。因此，《吕氏春秋·大乐》、《国语·周语下》等许多文献记载都认为度、量、衡起源于“律”；在中国古代，乐律学、天文历法学、古代计量学、古算学等等是融于一炉的。“同律度量衡”问题是上述学科的基础学说，涉及各学科的基本问题。

春秋战国时期，随着音乐活动和乐器制造的发展，我国古代律学也得到了很大的发展。人们对乐、律的认识进入了对概念进行规范、对度量关系进行计算、形成理论的阶段。这一时期的律制被后世称为“钟律”。钟律具有两个历史来源：一个是上古以来的纯律音乐的传统；另一个是西周始见的十二律名及其所代表的“三分损益法”。中国古籍中记载科学的律学理论，最早见于春秋时齐国相管仲在《管子·地员》篇中提出的“三分损益法”。

“三分损益”是一种生律的方法，即把一个振动体在长度上均分为三段，舍其三分之一，取其三分之二，称为“三分损一”。同样均分为三段，加其三分之一，称为三分之四，称为“三分益一”。如此继续相生而成各律，称为“三分损益法”；从精密的定律法看来，就是“三分损益律”。振动体三分损一所发之音，比原长所发之音高纯五度；三分益一所发之音比原长之音低纯四度。下方纯四度就是上方纯五度的转位，所以这种律制属于五度相生律[①]。

继《管子·地员》之后，有《吕氏春秋·音律》把三分损益法所生之律由五律增加到十二律：“黄钟生林钟，林钟生太簇，太簇生南吕，南吕生姑冼，姑冼生应钟，应钟生蕤宾，蕤宾生大吕，大吕生夷则，夷则生夹钟，夹钟生无射，无射生仲吕。三分所生，益之一分以上生；三分所生，去其一分以下生。黄钟、大吕、太簇、夹钟、姑冼、仲吕、蕤宾为上；林钟、夷则、南吕、无射、应钟为下。”（这里说的“上生”就是加长三分之一（乘以 4/3），

[①] 缪天瑞，《律学》，人民音乐出版社，1999，第 101 页

“下生”就是缩短三分之一（乘以 2/3），以此来定出另一律的长度[2]。）

相生次序	2	9	4	11	6	1	8	3	10	5	12	7
律　名	林钟	夷则	南吕	无射	应钟	黄钟	大吕	太簇	夹钟	姑冼	仲吕	蕤宾
相邻两律间的音分值	114　90　114　90　90　114　90　114　90　114　90											

这种生律法，以黄钟为元声，余声则依十二律次序循环计算，每隔八位生一律，因而也叫“隔八相生法”。

从相邻两律间的音分值看来，可知相邻两律间的音程，只有两种；一是五度相生律大半音，计 114 音分，另一种是五度相生律小半音，计 90 音分。由“三分损益法”所生的十二律，实际上是一种不平均律。它所形成的古代大全音（204 音分）较十二平均律的全音为大，古代小半音（90 音分）较十二平均律的半音为小。因此，三分损益法上下相生到第十二律仲吕时，就出现了“仲吕极不生”、“黄钟不能还原”的现象，暴露出十二律不能回归本律和无法“周而复始”的旋宫转调的问题，由此也揭开了长达两千多年之久的人们寻求理想的平均律的历史篇章。

先秦时期音乐科技在音乐声学领域的成果是巨大的，对于音乐实践来说它有更强的应用性，使乐器制造由简单、粗糙的形制发展至发声原理更为科学的程度。至于律学的发展成就，代表了中国音乐艺术的理论高度，有更重要的意义。仅从曾侯乙编钟反映出的中国古代律学三分损益律、纯律的使用技术为当时中国音乐创作中单声部旋律、多声部和声的发生提供了巨大的可能。而其中成果取得的关键在于当时数学计算中达到的“精、微”的高度水平和物理声学关于材料振动原理的具体应用。音乐声学的发展使得先秦音乐艺术在世界上取得了领先地位。

3. 音乐数学

早在几千年前，古代的先哲们就开始探索音乐与数学之间的奥秘。在西方古典时期，数学的范围不仅仅限于数学本身，数学中还包括算术、几何、天文和音乐；在古希腊，音乐之所以神圣而崇高是因为古希腊的科学家认为音乐反映出作为宇宙本质的数的关系。

3.1 律制中反映出的数的概念与计算技术

从目前考古出土的一些先秦时期的乐器来看，早在八千多年前，中国的先民已经有了初步的音阶观念。在此基础上人们在多方面的音乐实践中，特别是制造乐器的过程中，逐渐积累了一些经验，找到了一些关于管弦乐器发音的规律，这就在一定程度上促成了乐律理论的产生。经过殷周两代的长期酝酿，随着科学的进步，特别是数学的进步，乐律理论正式产生了。春秋时期的管仲在《管子·地员》中把宫、商、角、徵、羽各音的精密高度，

[2] 缪天瑞，《律学》，人民音乐出版社，1999，第 105 页

作了完全合于科学的论断，即从数理的角度，提出了“三分损益”律：

“凡将起五音，凡首，先主一而三之，四开以合九九，以是生黄钟小素之首以成宫。三分而益之以一，为百有八，为徵。有三分而去其乘，适足，以是生商。有三分而复于其成所，以是成羽。有三分去其乘，适足，以是成角。”

即以一个被定为基音的弦的长度为基础，把它三等分，再加一份（益一）或去掉一份（损一），就可以定出另一个律的长度。从数学上讲，即把基音的弦长乘以 4/3 或 2/3，照此法依次进行下去，直到获得比基音高出一倍或低一倍的音，就得出一个五声音阶。具体推算方法如下：令黄钟宫音的弦长为 81（一而三之，四开以合九九），$1\times3^4=9\times9=81$，则：

徵音弦长为 $81\times4/3=108$；

商音弦长为 $108\times2/3=72$；

羽音弦长为 $72\times4/3=96$；

角音弦长为 $96\times2/3=64$。

上述五音依弦的长短顺序排列，其间的频率比为

$$1:9/8:4/3:3/2:27/16$$

这段记载有可以充分的证明在春秋战国时期我国数学的发展已经有了指数的初步概念，而且已经开始了分数的运算。

在周代另一部著作《考工记》中记载了由于制造各种器具和乐器的需要而大量使用了分数及分数运算：“十分其铣，去二以为钲，以其钲为之铣间，去二分以为之鼓间。以其鼓间为之舞修，去二分以为舞广。以其钲之长为之甬长，以其甬长为之围。参分其围，去一以为衡围。参分其甬长，二在下，一在上，以设其旋”；“鼓长八尺，鼓四尺，中围加三之一，谓之鼖鼓”。这些事实显示我国早在公元前四、五世纪就已经建立了分数概念并有了广泛的应用。

3.2 出土音乐文物反映的几何学原理

新石器时代的考古中有一种陶制乐器——摇响器，一般多作球形或半球形，中空，内装陶丸或石粒，在早期文献里没有见到有关的记载。黄河流域和长江流域都有不少这种摇响器的出土（史料见附录 2－5）。

新石器时代的这些空心陶球，制作精致，非常规则。这些空心陶球的特点是：大多都有镂孔，孔与孔之间用实线或虚线连接，球壁厚度均匀，外面的连线都具有规律性。桂花树出土的陶球中有一个画着六条经线和一条纬线，经线基本上构成三个大圆，交于两个镂孔上，经纬线的交点上也是镂孔，还有一个以一个镂孔为中心画出“米”字型的双虚线。毛家山出土的也有一个与此相似，每个上面有六个孔，三对，每对正好是一个直径的两个端点。大溪的陶球也与此类似，也是六个孔，只是外面的连线稍有差别，三个直径互相垂直。

在数学发展史上，由实心球到空心球在几何认识上是一个很大的进步[①]。这些空心球说明早在五六千年以前，我国先民就已经有了不少有关球和球面几何的知识。

① 《中国数学史简编》，李 迪，辽宁人民出版社，1984，P16

春秋战国时期，在制造各种工具、器械、乐器过程中，常常会遇到需要把两个棒形物曲折相接，或者是将金属板、木板做成多边形，这就要用到角的概念。在《考工记》一书中有不少这方面的记载。这本书对于角和几种特殊角都有专门名称，非直角叫做“倨句（ju gou)”；“倨”是钝角；“句”是锐角；直角叫做“倨句中矩”或简称“一矩”。例如“磬氏为磬：倨句一矩有半”，是指石磬背部的折角的规格，其大小是一个直角（矩）再加上半个直角。

在自然科学的发展中，数学是基础。数学在音乐艺术发展中自然也是起到了最基础的作用。否则就不会出现精美的乐器、多种音律、音阶，而这些也正是音乐创作发展的必须条件。

4. 乐器制造中的材料工艺技术

乐器的制造材料和工艺直接影响到乐器的音响性能。不同的制造材料，不同的工艺技术水准，表现在乐器的音响品质上肯定会有差异。中国古代对乐器的制造，在材料选择和工艺应用方面经历了一个不断试验、不断摸索和逐渐优化的过程。西周时按不同材料把乐器分为“八音”，这表明当时人们已经知道金属、木头、陶土、皮革、石头、丝织物体、植物等均能发声和传声，而且有不同的音色。

4.1 磬的材料工艺技术

在原始社会，石器是主要的生产工具，原始的科学技术就诞生在石器制作的过程中。在漫长的石器时代，我们的祖先经过长期石器制造与使用的劳动实践，逐渐发现并掌握某些能够发出动听乐音的片状石料（如角页岩、石炭岩）之后，使磬这种乐器的出现成为可能，人类石器制作和使用经验的积累，为磬的出现创造了条件。

新石器时代石磬的制造均选用天然石片，岩类主要有角页岩、粉沙岩和石灰岩等。新石器时代石磬多为打制，磨制磬较少。悬孔的作法有对钻和划孔两种，磬厚薄的变化总体趋势是由鼓部至股部逐渐增厚。磬的外观呈不规则的几何性，器形厚大，表面凹凸不平。磬的形制的不规整主要是因为当时的工具简陋、技术拙劣、制磬者不得不就石片的自然形状进行加工以及对材性掌握不足所致。

商代的磬多数出土与河南安阳殷墟。除有特磬外，还出现了成组的编磬。商代石磬打磨兼制，器形仍较厚大，但外形已比较规整，磨制磬的表面光平并开始出现了纹饰（刻纹或绘纹）。商磬的制造材料一般用石灰岩材，这当是基于长期历史实践所做出的最佳选择。石灰岩产地光，取材便利，属成层岩类，具有易于剥离成片、断口平直等特性，便于制造板体石磬。此外，石灰岩的密度较高，击奏音响效果比较理想。因此，周代的石磬都是由石灰岩制成。

上文提到的晚商时期的一组3件一套的刻铭编磬（永啟、夭余、永余），三石的几何形状略有差异。但如果把这三石都用钝角三角形框起来，就会发现它们的三个内角的角度，以及高和上面两边的连比是相同的。最大的内角为 130^0 的钝角，其余两个内角分别为 30^0 和 20^0，高和上面两边的连比为1：2：3。因此可以认为，这个钝角三角形是具有规范意义的制坯标准。由此可以推知，这组编磬的著作程序大致为：

设计出制坯标准；

按照制坯标准选好石料，制出磬坯；

根据型式标准进一步加工，制出成型而发音接近音质标准（音质和音准）的半成品；

根据音质标准磨错面和边以进行微调或精调，制成合格的成品。

这表明商代末期编磬的制造较前代有了很大的，可以说是飞跃性的进步，初步做到以因声记材取代以往的因声就材、以较规范化的型式取代以往无固定标准的混合型式。

目前所知西周磬型式有弧顶和倨顶两种。弧顶型的磬仅见于特磬，编磬则都是倨顶型。西周磬均为磨制，做孔用管钻，在制造工艺上取得了很大进步。西周磬在继承晚商磬形制的基础上，已经发展到基本定性的规范化阶段，即都是倨顶、底边平直和略微内凹的凸五边形磬。倨顶型磬在西周时期的确立，为编磬在东周时期的繁盛发展奠定了基础。

东周磬都是编磬，以 10 件和 13 件较为常见，其型式均为倨句、股鼓分明、底部呈凹弧形的倨顶型磬。倨顶型磬因其股短阔而鼓狭长，所以在悬起时鼓部自然下倾，重心下移，既有利于保持磬体的稳定，又便于击奏鼓部，因为经测试表明，击奏磬的鼓上角处发音最好。另一方面，这种形制的磬，其调音部位固定，主要集中在磬底和鼓端，磬底的凹弧就是因研磨调音所致。而选择把磬底磨成弧形而不是从底部一直平磨，是考虑到平磨后会改变鼓博和股博的大小，相对使磬体变得瘦长，对磬的外形改变过大。而磨成弧形则不会改变股博和股博的大小，且能达到调音效果。这些理论就是周代的科技著作《考工记·磬氏》记录的东周时期制磬调音技法的理论总结。关于东周磬的主要部位比例和制造规格，《考工记·磬氏》中也有详细的记载。

倨句$=90^0\times3/2=135^0$

股博$=1$

股上边$=1\times2=2$

鼓上边$=1\times3=3$

鼓博$=1\times2/3=0.67$，

厚$=2/3\times1/3=0.22$。

4.2 钟的材料工艺技术

夏商周三代是中国的青铜时代，青铜业的发展成为这一时期科技进步的重要标志。青铜业的辉煌成就同时也造就了中国音乐史上“金”类乐器前所未有的发展。高度

成书于春秋时代的《周礼·考工记》记载了世界冶金史上最早的合金配比工艺：“金有六齐。六分其金而锡居一，谓之钟鼎之齐。五分其金而锡居一，谓之斧金之齐。四分其金而锡居一，谓之戈戟之齐。参分其金而锡居一，谓之大刃之齐。五分其金而锡居二，谓之削杀矢之齐。金锡半，谓之鉴燧之齐”：

	铜	锡
钟鼎之齐	5/6（83.33 %）	1/6（16.67 %）
斧斤之齐	4/5（80 %）	1/5（20 %）
戈戟之齐	3/4（75 %）	1/4（25 %）

大刃之齐	2/3（66.67 %）	1/3（33.33 %）
削杀矢之齐	3/5（80 %）	2/5（40 %）
鉴燧之齐	1/2（50 %）	1/2（50 %）

关于青铜熔炼浇铸温度的掌握，《考工记·凫氏》中记载了观察熔炼过程中火焰的光色以判断冶炼温度的方法："凡铸金之状：金与锡黑浊之气竭，黄白次之；黄白之气竭，青白次之；青白之气竭，青气次之。然后可铸也。"在用铜（金）和锡熔炼青铜时要以木炭作燃料，木炭开始燃烧时产生的黑烟形成"黑浊之气"。随着温度升高，氧化物、硫化物和熔点较低的金属依次发挥出来，形成黄白焰色；当温度进一步升高是，铜的气体所占比重增大，焰色转向青白；最后青色占了绝对又是，达到"炉火纯青"，说明其他杂质大部分都跑掉了，铜锡已充分熔合，可以浇铸。

在音乐创作实践中，乐器占有至关重要的位置，乐器制作技术的进展直接关系到音乐创作的发展。乐器制作的发展当然要依靠材料工艺水平的发展，乐器制作发展到精美的程度自然是艺术品，但它同时也会成为当时科学技术的水平的见证。先秦时期制作的编磬、编钟等乐器都可以说是最有说服力的证据。

结　语

通过本文第二、第三部分对中国先秦的音乐科技史料和先秦出土的音乐文物的考察、研究，我们可以看到先秦科学技术的发展的优秀成果促进了中国先秦音乐艺术辉煌成果的形成。中国古代最早的乐器分类法"八音"就是依据乐器制作材料的不同，将其分为八个类别，很显然这受益于先秦的材料工艺技术的发展。闻名世界的曾侯乙编钟，在乐器声学上、在制造工艺上、在乐律学方面，都代表了先秦音乐理论发展的最高成果，代表了先秦钟磬音乐的最高成就。试设想，而如果没有先秦时期辉煌的科学技术成就作为支撑，就不可能产生以曾侯乙编钟为代表的先秦音乐文化，也就不可能产生我国音乐史上的第一高峰。

当然，从另一方面讲，在先秦音乐科技的研究中我们也不能忽略某些产生自音乐领域的科研成果，对中国先秦科技发展的推动作用。特别是在文字出现以前，先民们创造的原始音乐艺术、乐器等具体的记录了早期人类的科学技术的思维与观念。透过这些具体的音乐事物，我们可以观测到当时科学技术的发展状况。河南舞阳贾湖骨笛就是一个最有说服力的例证。还有新石器时代出土各个遗址出土的摇响器，其形状、纹饰的发展、流变记录了先民们对几何形状、几何图案的认识过程；先秦文献《管子·地员》中记载了中国最早的生律法，这同时也是中国数学史上出现的最早的"指数"计算技术；《考工记》在讲述工匠们制作钟磬等乐器的比例、规格时就用到了中国最早的分数计算方法。

我们仅从先秦音乐科技的研究中就可以得出结论：音乐与科技之间存在着密切的联系。如今发展音乐科技研究有着重大的现实意义。音乐理论人才的培养需要有科学技术知识。古代音乐科学家沈括、朱载堉，现代音乐理论家黄翔鹏，乃至20世纪西方表现主义作曲家勋伯格、微分音音乐作曲家哈巴、噪音音乐作曲家瓦列兹、序列主义音乐作曲家梅西安、电子音乐作曲家施托克豪森等等，在他们的音乐研究、音乐创作中无不体现出自然科学的智慧。

综上所述，音乐科技研究的确是值得我们重视的学科领域，我们可以从找出其间的规律，提高我们对音乐与大自然之间关系的认识，促进音乐艺术的创新。可以断言，发展音乐科技这一边缘学科有着广阔的前景。

参考文献

[1] 修海林 中国古代音乐史料集[M]，世界图书出版社，2000

[2] 刘洪涛 中国古代科技史[M]，南开大学出版社，1991

[3] 殷玮璋 中国远古暨三代科技史[M]，人民出版社，1994

[4] 中先甲 中国春秋战国科技史[M]，人民出版社，1994

[5] （清）阮刻 十三经注疏[M]，中华书局出版社 1980

[6] 江 灏 今古文尚书全译[M]，贵州人民出版社，1990

[7] 沈凤笙 周礼·仪礼·礼记[M]，岳麓书社 1991

[8] 林 尹 周礼今注今译[M]，书目文献出版社，1985

[9] 栗 劲 白话四书五经[M]，长春出版社，1992

[10] （春秋）左丘明 春秋左传集解[M]，上海人民出版社，1977

[11] 杨伯峻 春秋左传注[M]，中华书局，1981

[12] 四部丛刊[M]，上海书店，1986，

[13] 邬国义 国语译注[M]，上海古籍出版社，1994

[14] 周瀚光 管子直解[M]，复旦大学出版社，2000

[15] （清）郭庆藩 庄子集释[M]，中华书局，1978

[16] 黄翔鹏，溯流探源[M]，人民音乐出版社，1994

[17] 王 宁 评析本白话晏子春秋[M]，北京广播学院出版社，1992

[18] 中法汉学研究所 吕氏春秋[M]，上海古籍出版社，1989

[19] 吉联抗 吕氏春秋中的音乐史料[M]，上海文艺出版社，1963

[20] 自然科学史研究所 中国古代科技成就[M]，中国青年出版社，1978

[21] 方建军 中国古代乐器概论（远古一汉代）[M]，陕西人民出版社，1996

[22] 李纯一 先秦音乐史[M]，人民音乐出版社，1994

[23] 李 迪 中国数学史简编[M]，辽宁人民出版社，1984

[24] 中外数学简史编写组 中国数学简史[M]，山东教育出版社，1986

[25] 黄翔鹏 乐问[M]，中央音乐学院学报社，2000

[26] 吉联抗译注 两汉论乐文字辑译[M]，人民音乐出版社，1980

[27] 吉联抗辑译 秦汉音乐史料[M]，上海文艺出版社，1981

[28] 刘再生 中国古代音乐史简述[M]，人民音乐出版社，2000

[29] 杨荫浏 中国古代音乐史稿[M]，人民音乐出版社，1980

[30] 缪天瑞 律学[M]，人民音乐出版社，1999

[32] 李纯一 中国上古出土乐器综论[M]，文物出版社，1996

[33] 徐飞、夏季、王昌燧 贾湖骨笛音乐声学特性的新探索[J]，音乐研究，2004.1

[34] 崔宪 先秦乐律的历史流变[J]，黄钟，1994.1－2

[35] 陈应时 中国传统音乐基本理论[J]，音乐艺术，1995. 3

[36] 崔宪 曾侯乙编钟律学研究[J]，中国音乐学，1994.1

[37] 箫兴华 中国音乐文化文明九千年[J]，音乐研究，2000.1

[38] 李纯一 《管子·地员篇》中的五行说[J]，中国音乐学，1994.4

[39] 唐继凯 中国古代天文历法与律吕之学[J]，交响，2000.3

[40] （日）薮内 清 中国·科学·文明[M]，山东教育出版社，1986

附录1 先秦音乐科技文献史料

1.《尚书》

《虞夏书·舜典》

岁二月，东巡守，至于岱宗，柴。望秩于山川，肆觐东后。协时月正日，同律度量衡。修五礼、五玉、三帛、二生、一死贽。如五器，卒乃复。五月南巡守，至于南岳，如岱礼。八月西巡守，至于西岳，如初。十有一月朔巡守，至于北岳，如西礼。归，格于艺祖，用特。

帝曰："夔！命汝典乐，教胄子，直而温，宽而栗，刚而无虐，简而无敖。诗言志，歌永言，声依永，律和声。八音克谐，无相夺伦，神人以和。"

夔曰："於！予击石拊石，百兽率舞。"

（清）阮刻《十三经注疏》本《尚书注疏》，中华书局出版社，1980

2.《周礼》

《春官宗伯第三》

典同：掌六律、六同之和。以辨天地四方阴阳之声，以为乐器。凡声，高声石昆，正声缓，下生肆，陂声散，险声敛，达声赢，微声韽，回声衍，侈声筰，弇声郁，薄声甄，厚声石。凡为乐器，以十有二律为之度数，以十有二声为之齐量。凡和乐亦如之。

《冬官考工记第六》

攻金之工，筑氏执下齐，冶氏执上齐，凫氏为声，栗氏为量，段氏为镈器，桃氏为刃。

金有六齐。六分其金而锡居一，谓之钟鼎之齐。五分其金而锡居一，谓之斧金之齐。四分其金而锡居一，谓之戈戟之齐。参分其金而锡居一，谓之大刃之齐。五分其金而锡居二，谓之削杀矢之齐。金锡半，谓之鉴燧之齐。

……

凫氏为钟。

两栾谓之铣，铣间谓之于，于上谓之鼓，鼓上谓之钲，钲上谓之舞，舞上谓之甬，甬上谓之衡。钟县谓之旋，旋虫谓之干。钟带谓之篆，篆间谓之枚，枚谓之景。于上之攠谓之遂。

十分其铣，去二以为钲，以其钲为之铣间，去二分以为之鼓间。以其鼓间为之舞修，去二分以为舞广。以其钲之长为之甬长，以其甬长为之围。参分其围，去一以为衡围。参分其甬长，二在下，一在上，以设其旋。

薄厚之所震动，清浊之所由出。侈弇之所由兴，有说。钟已厚则石，已薄则播，侈则柞，弇则郁，长甬则震。是故大钟十分其鼓间，以其一为之厚；小钟十分其钲间，以其一为之厚。钟大而短，则其声疾而短闻；钟小而长，则其声舒而远闻。为遂，六分其厚，以其一为之深而圜之。

……

凡铸金之状：金与锡黑浊之气竭，黄白次之；黄白之气竭，青白次之；青白之气竭，

青气次之。然后可铸也。

……

韗人为皋陶。

长六尺有六寸，左右端广六寸，中尺，厚三寸。穹者三之一。上三正。

鼓长八尺，鼓四尺，中围加三之一，谓之鼖鼓。为皋鼓，长寻有四尺，鼓四尺，倨句，磬折。凡冒鼓，必以启蛰之日。

良鼓暇如积环。鼓大而短，则其声疾而短闻。鼓小而长，则其声舒而远闻。

……

磬氏为磬。

倨句一矩有半。其博为一，股为二，鼓为三。参分其股博。去一以为鼓博。参分其鼓博，以其一为之厚。已上则摩其旁，已下则摩其端。

（清）阮刻《十三经注疏》本《周礼注疏》，中华书局出版社，1980

3.《礼记》

《月令》

孟春之月，日在营室，昏参中，旦尾中。其日甲乙。其帝太皞，其神句芒。其虫鳞。其音角，律中大簇。其数八。其味酸，其臭膻。其祀户，祭先脾。

仲春之月，日在奎，昏弧中，旦建星中。其日甲乙。其帝太皞，其神句芒。其虫鳞。其音角，律中夹钟。其数八。其味酸，其臭膻。其祀户，祭先脾。

季春之月，日在胃，昏七星中，旦牵牛中。其日甲乙。其帝太皞，其神句芒。其虫鳞。其音角，律中姑冼。其数八。其味酸，其臭膻。其祀户，祭先脾。

孟夏之月，日在毕，昏翼中，旦婺女中。其日丙丁。其帝炎帝，其神祝融。其虫羽。其音徵，律中仲吕。其数七。其味苦，其臭焦。其祀灶，祭先肺。

仲夏之月，日在东井，昏元中，旦危中。其日丙丁。其帝炎帝，其神祝融。其虫羽。其音徵，律中芮并。其数七。其味苦，其臭焦。其祀灶，祭先肺。

季夏之月，日在柳，昏火中，旦奎中。其日丙丁。其帝炎帝，其神祝融。其虫羽。其音徵，律中林钟。其数七。其味苦，其臭焦。其祀灶，祭先肺。

孟秋之月，日在翼，昏建星中，旦毕中。其日庚辛。其帝少皞，其神蓐收。其虫毛。其音商，律中夷则。其数九。其味辛，其臭胜。其祀门，祭先肝。

仲秋之月，日在甬，昏牵牛中，旦觜觿（xi）中。其日庚辛。其帝少皞，其神蓐收。其虫毛。其音商，律中南吕。其数九。其味辛，其臭胜。其祀门，祭先肝。

季秋之月，日在房，昏虚中，旦柳中。其日庚辛。其帝少皞，其神蓐收。其虫毛。其音商，律中无射。其数九。其味辛，其臭胜。其祀门，祭先肝。

孟冬之月，日在尾，昏危中，旦七星中。其日壬癸。其帝颛顼，其神玄冥。其虫介。其音羽，律中应钟。其数六。其味咸，其臭朽。其祀行，祭先肾。

仲冬之月，日在斗，昏东壁中，旦轸中。其日壬癸。其帝颛顼，其神玄冥。其虫介。其音羽，律中黄钟。其数六。其味咸，其臭朽。其祀行，祭先肾。

季冬之月，日在婺女，昏娄中，旦氐中。其日壬癸。其帝颛顼，其神玄冥。其虫介。其音羽，律中大吕。其数六其味咸，其臭朽。其祀行，祭先肾。

（清）阮刻《十三经注疏》本《礼记注疏》，中华书局出版社，1980

4.《左传》

《昭公元年》

先王之乐，所以节百事也。故有五节，迟速本末以相及，中声以降，五降之后，不容弹矣。于是有烦手淫声，慆堙心耳，乃忘平和，君子弗听也。物亦如之，至于烦，乃舍也已，无以生疾。君子之近琴瑟，以仪节也，非以慆心也。天有六气，降生五味，发为五色，征为五声，淫生六疾。六气曰阴、阳、雨、晦、明也，分为四时，序为五节，过则为菑：阴淫寒疾，阳淫热疾，风淫末疾，雨淫腹疾，晦淫惑疾，明淫心疾。

《昭公二十五年》

夫礼，天之经也，地之义也，民之行也。天地之经，而民实择(则)之。则天之明，因地之性，生其六气，用其五行。气为五味，发为五色，章为五声，淫则混乱，民失其性。是故为礼以奉之，为六畜、五牲、三牺，以奉五味；为九文、六采、五章，以奉五色；为九歌、八风、七音、六律，以奉五声；……

（春秋）左丘明，春秋左传集解，上海人民出版社，1977

5.《国语》

《周语上》

古者，太史顺时覛土。阳瘅愤盈，土气震发。农祥晨正，日月底于天庙，土乃脉发。

先时九日，太史告稷曰："自今日至于初吉，阳气俱蒸，土膏其动。弗震弗渝，脉其满眚，谷乃不殖。"稷以告，王曰："史帅阳官以命我司事。"曰："距今九日，土其俱动，王其祗祓，监农不易。"王乃命司徒咸戒公卿、百吏、庶民，司空除坛于籍，命农待发咸戒农用。

先时五日，瞽告有协风至，王即斋宫，百官御事，各即其斋三日……及期……及籍，后稷监之，膳夫、农正陈籍礼，……王耕一墢，班三之，庶民终于千亩……

是日也，瞽帅音官以风土……稷则徧戒百姓，纪农协功，曰："阴阳分布，震雷出滞。"土不备垦，辟在司寇。

《周语下》

王将铸"无射"，问律於伶州鸠。对曰："律所以立均出度也。古之神瞽，考中声而量之以制，度律均（古代校正乐器音律的器具）钟（测度、规范编钟的制作），百官轨仪，纪之以三，平之以六，成於十二，天之道也。夫六，中之色也，故名之曰黄钟，所以宣养六气、九德也。由是第之：二曰太簇，所以金奏赞阳出滞也；三曰姑洗，所以修洁百物，考神纳宾也；四曰蕤宾，所以安靖神人，献酬交酢也；五曰夷则，所以咏歌九则，平民无贰也；六曰无射，所以宣布哲人之令德，示民轨仪也。为之六间，以扬沈伏而黜散越也。元间大吕，助宣物也；二间夹钟，出四隙之细也；三间仲吕，宣中气也；四间林钟，和展百事，俾莫不任肃纯恪也；五间南吕，赞阳秀物也；六间应钟，均利器用，俾应复也。

王曰："七律者何？"对曰："昔武王伐殷，岁在鹑火，月在天驷，日在析木之津，辰在斗柄，星在天鼋。星与日辰之位，皆在北维，颛顼之所建也，帝喾受之。我姬氏出自天鼋，及析木者，有建星及牵牛焉，则我皇妣大姜之侄、伯陵之后——逄公之所凭神也。岁之所在，则我有周之分野也。月之所在，辰马农祥也，我太祖后稷之所经纬也。王欲合是五位三所而用之：自鹑及驷七列也，南北之揆七同也。凡人神以数合之，以声昭之；数合声和，然后可同也；故以七同其数，而以律和其声，於是乎有七律。"

《郑语》

公曰："周其弊乎？"对曰："殆于必弊也，《泰誓》曰：'民之所欲，天必从之。'今王弃高明昭显，而好谗慝暗昧；恶角犀丰盈，而近顽童穷固；去和而取同。夫合实生物，同则不继。以它平它谓之和，故能丰长而物生之；若以同裨同，尽乃弃矣。故先王以土与金木水火杂，以成百物。是以和五味以调口，刚四肢以卫体，和六律以聪耳，正七体以役心，平八索以成人，建九纪以立纯德，合十数以训百体，出千品，具万方，计亿事，材兆物，收经入，行女亥极。故王者居九田亥之田，收经入，以食兆民，周训而能用之，和乐如一。夫如是，和之至也。于是乎，先王聘后于异姓，求财于有方，择臣取谏工，而讲以多物，务和同也。声一无听，物一无文，味一无果，物一不讲。王将弃是类也而与剸同。天夺之明，欲无弊，得乎？"

四部丛刊，上海书店，1986

6.《管子》

《幼官》

五和时节，君服黄色，味甘味，听宫声，治和气，用五数，饮于黄后之井，以课鲁之火爨。藏温儒，行驱养，坦气修通。

八举时节，君服青色，味酸味，听角声，治燥气，用八数，饮于青后之井，以羽兽之火爨。藏不忍，行驱养，坦气修通。

举时节，君服赤色，味昔味，听羽声，治阳气，用七数，饮于赤后之井，以毛兽之火爨。藏薄纯，行笃厚，坦气修通。

九和时节，君服白色，味辛味，听商声，治湿气，用九数，饮于白后之井，以介兽之火爨。藏恭敬，行搏锐，坦气修通。

《地员》

夫管仲之匡天下也，其施七尺，其立名而责实。

渎田：息土……见是土也，命之曰五施，五七三十五尺而至于泉，呼音中角；其水苍……赤垆……见是土也，命之曰四施，四七二十八尺而至于泉，呼音中商；其水白而甘……黄唐……见是土也，命之曰三施，三七二十一尺而至于泉，呼音中宫；其泉黄臭……赤埴……见是土也，命之曰再施，二七十四尺而至于泉，呼音中羽；其泉咸赤……黑埴……见是土也，命之曰一施，七尺而至于泉，呼音中徵；其水黑而苦……

凡听徵，如负猪，豕觉而骇。凡听羽，如鸣马在野。凡听宫，如牛鸣窌中。凡听商，如离群羊。凡听角，如雉登木以鸣，音疾以清。

凡将起五音，凡首，先主一而三之，四开以合九九，以是生黄钟小素之首以成宫。三分而益之以一，为百有八，为徵。有三分而去其乘，适足，以是生商。有三分而复于其成所，以是成羽。有三分去其乘，适足，以是成角。

郭沫若，《管子集校》，科学出版社，1956

7.《庄子》

《徐无鬼》

鲁遽……于是为之调瑟，废一于堂，废一于室，鼓宫宫动，鼓角角动，音律同矣。夫或改调一弦，于五音无当也，鼓之，二十五弦皆动，未始异于声，而音之王也。

（清）郭庆藩，庄子集释，中华书局，1978

8.《晏子春秋》

《内篇杂下第六》

景公新成柏寝之台，使师开鼓琴。师开左扶宫，右弹商，曰："室夕。"公曰："何以知之？"师开对曰："东方之声薄，西方之声扬。"

晏婴，《晏子春秋》，上海古籍出版社，1989

9.《韩非子》

《外储说左下》

（齐宣王）又问："儒者鼓瑟乎？"（匡倩）对曰："不也。夫瑟以小弦为大声，以大弦为小声，是大小易序，贵贱易位。"

韩非著，《韩非子》，上海古籍出版社，1989

10.《吕氏春秋》

《大乐》

音乐之所由来者远矣。生於度量；本於太一。

太一出两仪，两仪出阴阳，阴阳变化，一上一下，合而成章；浑浑沌沌，离则复合，合则复离，是谓天常。天地车轮，终则复始，极则复反，莫不咸当。日月星辰，或疾或徐。日月不同，以尽其行。四时代兴，或暑或寒，或短或长，或柔或刚。万物所出，造于太一，化于阴阳。萌芽始震，凝寒以形。形体有处，莫不有声。声出于和，和出于适。先王定乐由此而生。

《古乐》

昔黄帝令伶伦作为律。伶伦自大夏之西，乃之昆仑之阴，取竹之嶰谷，以生空窍厚薄钧者，断两节间——其长三寸九分而吹之，以为黄钟之宫，曰"含少"；次制十二筒，以之昆仑之下，听凤凰之鸣，以别十二律。其雄鸣为六，雌鸣亦六，以比黄钟之宫，适合，黄钟之宫，皆可以生之。故曰：黄钟之宫，律之本也。黄帝又命伶伦与荣援铸十二钟，以和

五音，以施《英》《韶》；以仲春之月，乙卯之日，日在奎，始奏之，命之曰《咸池》。

帝颛顼生自若水，实处空桑，乃登为帝，惟天之合，正风乃行，其音若熙熙凄凄锵锵。帝颛顼好其音，乃令飞龙作乐，效八风之音，命之曰《承云》，以祭上帝。乃令鱓先为乐倡。鱓乃偃寝，以其尾鼓其腹，其音英英。

帝喾命咸黑作为声歌：《九招》、《六列》、《六英》；有倕作为鼙、鼓、钟、磬、笙、管、埙、篪、鞉、椎、钟，乃令人抃，或鼓鼙，擊钟、磬，吹笙，展管、篪；因令凤鸟天翟舞之。帝喾大喜，乃以康帝德。

帝尧立，乃命质为乐。质乃效山林谿谷之音以作歌，乃以麋革各冒缶而鼓之，乃拊石擊石，以象上帝玉磬之音，以致舞百兽。瞽叟乃拌五弦之瑟以为十五弦之瑟，命之曰《大章》，以祭上帝。

舜立，命延乃拌瞽叟之所为瑟，益之八弦，以为二十三弦之瑟。帝舜乃令质修《九招》、《六列》、《六英》，以明帝德。

《音律》

黄钟生林钟；林钟生太簇；太簇生南吕；南吕生姑冼；姑冼生应钟；应钟生蕤宾；蕤宾生大吕；大吕生夷则；夷则生夹钟；夹钟生无射；无射生仲吕。

三分所生，益之一分以上生。三分所生，去其一分以下生。黄钟、大吕、太簇、夹钟、姑冼、仲吕、蕤宾为上；林钟、夷则、南吕、无射、应钟为下。

大圣至理之世，天地之气，合而生风。日至则月钟其风，以生十二律：仲冬日短至，则生黄钟，季冬生大吕，孟春生太簇，仲春生夹钟，季春生姑冼，孟夏生仲吕；仲夏日长至，则生蕤宾，季夏生林钟，孟秋生夷则，仲秋生南吕，季秋生无射，孟冬生应钟。天地之风气正，则十二律定矣。

《有始览第二•应同》

类同相召，气同则合，声比则应。鼓宫而宫动，鼓角而角动。

中法汉学研究所　吕氏春秋，上海古籍出版社，1989

11. 《韩诗外传》

赵王使人于楚。鼓瑟而遣之，曰："慎无失吾言。"使者受命，伏而不起，曰："大王鼓瑟，未尝若今日之悲也。"王曰："调。"使者曰："调，则可记其柱。"王曰："不可。天有燥湿，弦有缓急，柱有推移，不可记也。"

韩婴　《韩诗外传集释》，中华书局，1980

12. 《春秋繁露》

《同类相动第五十七》

……故气同则会，声比则应，其验皦然也。试调琴瑟而错之，鼓其宫则他宫应之，鼓其商而他商应之。五音比而自鸣，非有神，其数然也。……故琴瑟报，弹其宫，他宫自鸣而应之。此物之以类动者也。其动以声而无形，人不见其动之形，则谓之自鸣也。

董仲舒撰，《春秋繁露》，中华书局，1975

13.《淮南鸿烈》

《览冥训》

今夫者调弦者，叩宫宫应，弹角角应，此同声相和者也。夫有改调一弦，其与五音无所比，鼓之，而二十五弦皆应。此未始异于声，而音之君已形也。

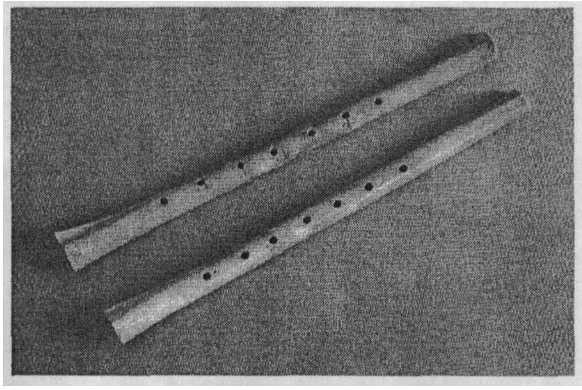
《齐俗训》

故叩宫而宫应，弹角而角动，此同音之相应也。其与五音无所比，而二十五皆应，此不传之道也。

刘文典，《淮南鸿烈集解》，中华书局，1989

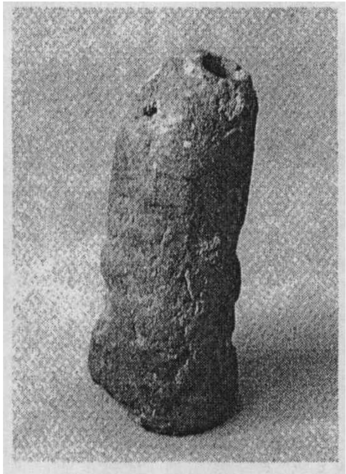
附录2 先秦时期的音乐考古实证材料

1. 贾湖骨笛

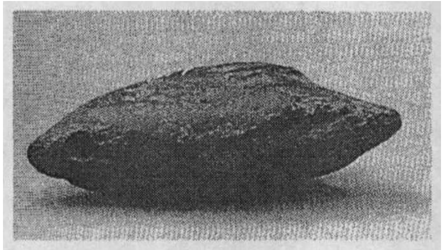


图一 骨笛（M282：21，20），河南舞阳贾湖出土，上长23.6厘米，下长22.2厘米

2. 埙

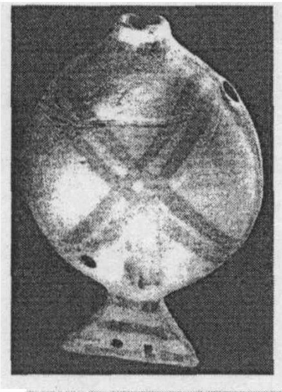


图二 山西荆村无音孔埙，高5.4厘米

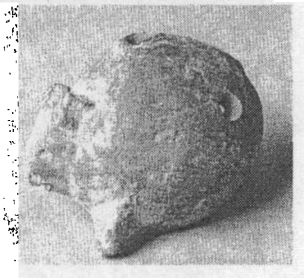


图三 西安半坡一音孔埙

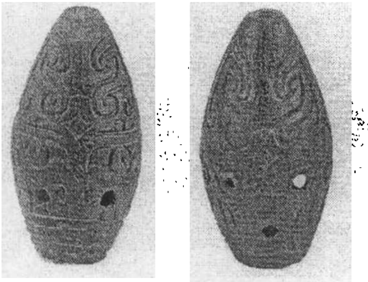
图四 山西襄汾陶寺遗址采集的陶寺类型埙，泥质加砂褐陶，手制，有小平底的长卵形，顶端有一圆形吹孔，上部有两个圆形指孔



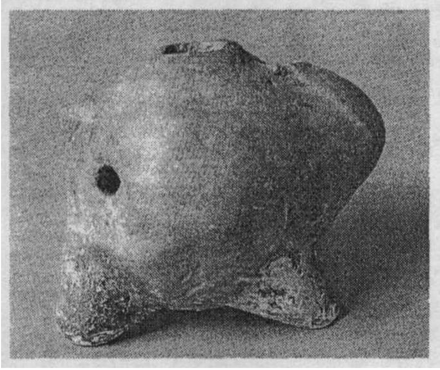
图五 甘肃火烧沟四坝文化鱼形埙



图六 河南郑州二里岗上层兔埙



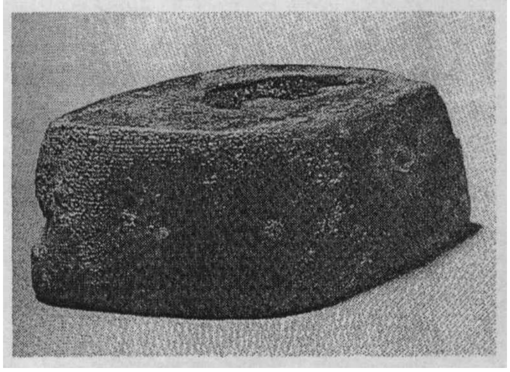
图七 安阳西北岗 M1001 大墓兽面纹骨埙



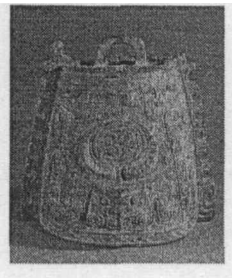
图八 河南郑州二里岗上层兽埙

3. 钟与编钟

图九 河南陕县庙底沟遗址出土的陶铃 通高 9.2 厘米，口径 5 厘米。细泥红陶捏制而成，表面磨光，铃体为圆台形，上实下空，圆顶，平口，肩下两侧有一对对称的斜孔直通体内，顶上有圆钮

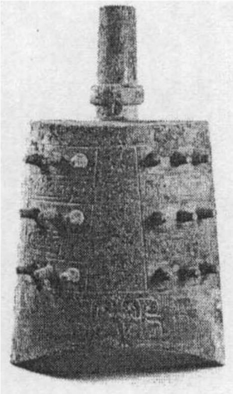


图十 陶寺墓葬出土的陶寺类型晚期铜铃，高 2.65 厘米，口径 6.3－2.7 厘米，纯铜铸成，形制为合瓦体，平顶，两侧和顶部有铸造缺陷和气孔，顶部一侧存有一个钻成的悬舌空，体表有纺织物纹痕迹。

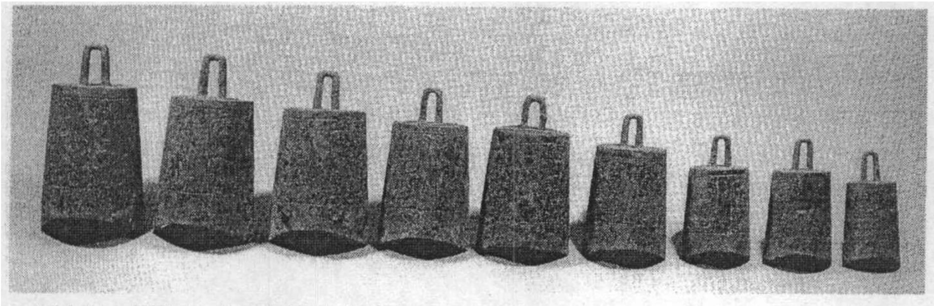


图十一　江西新干大洋州墓葬出土，商代晚期，通高 33 厘米，口径为 18.5 厘米×26.4 厘米，

图十二　克镈，陕西扶风任村出土，西周晚期，通高 63.5 厘米，口径为 34.7 厘米×7 厘米，钮和四翼均作透雕的扁连环夔纹，钮和侧翼连为一体。钲面饰对夔纹，上下两边各有一条缀四个等距离的突䕫绊带。

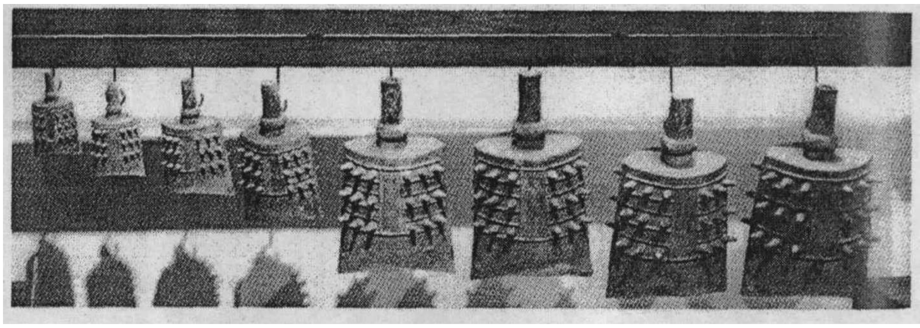


图十三　云纹式甬钟 陕西宝鸡竹园沟出土

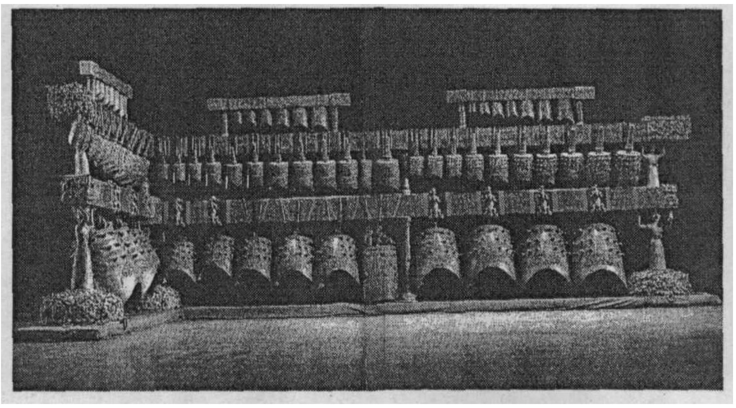


图十四　钮钟　山西闻喜上郭出土

图十五 河南温县殷铙

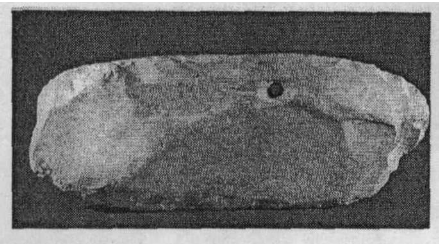


图十六 陕西扶风出土的柞钟

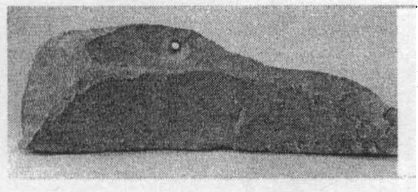


图十七 曾侯乙编钟

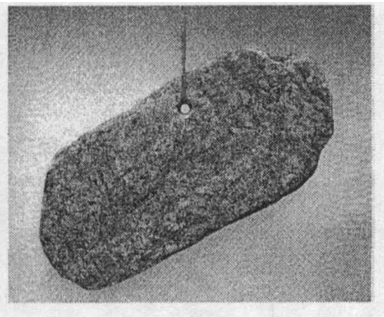
4. 磬与编磬



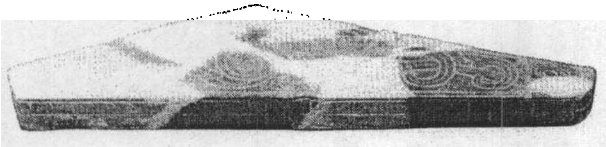
图十八 陶寺 M3015 特磬，高 32 厘米，长 79 厘米，厚 1－1.5 厘米。利用天然黑色角页岩打制而成，表面粗糙不平，有明显的酥点和破裂面。薄厚不均，股部较厚而股部较薄。股上边和鼓上边连成一条直线，股端微凸而鼓端微凹，底边略平。在偏向股部一侧的上部钻已长圆形悬孔。



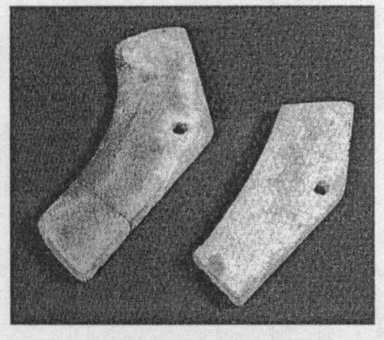
图十九　陶寺 M3002 特磬，天然片料打制而成，一面略经琢饰，底边磨平。磬面高低不平，股部较厚，股部较薄。略呈凸五边形。



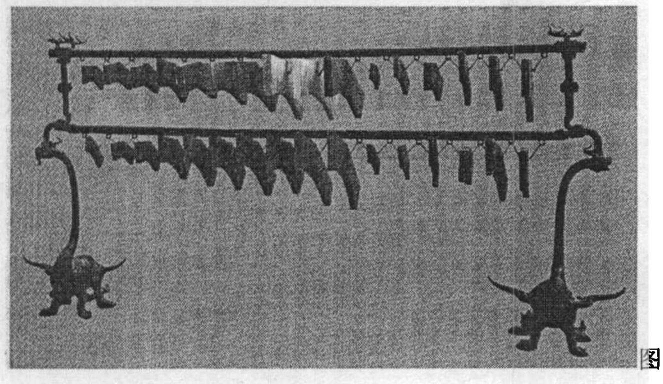
图二十　南安阳殷墟西区 M991 墓彩绘特磬，高 39.5 厘米，长 62.5 厘米，厚 3 厘米



图二十一　陕西扶风召陈西周编磬青黑色石灰石细磨精雕而成，管钻悬孔，股上、鼓上和股端三边笔直，据句 1380

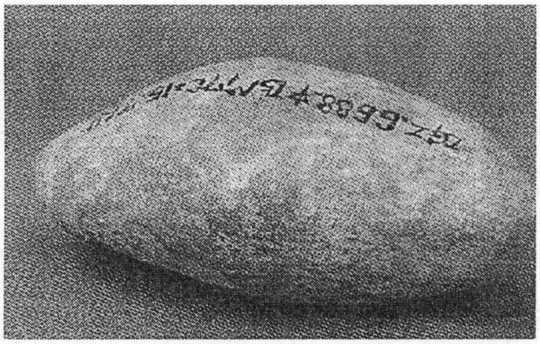


图二十二　太原金胜村编磬

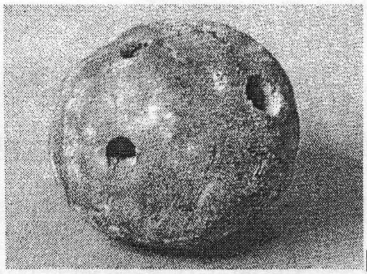


图二十三　曾侯乙编磬

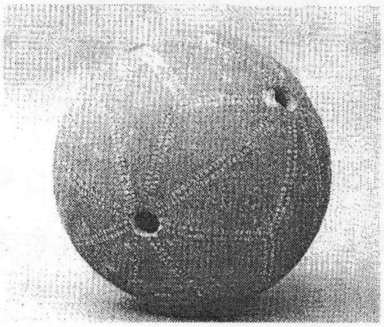
5. 摇响器



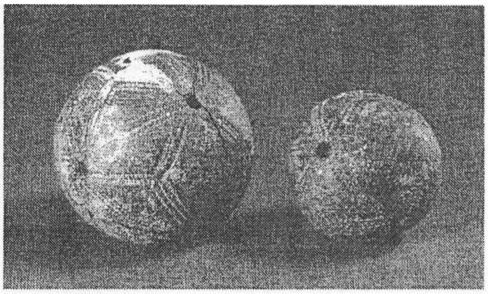
图二十四　陕西临潼姜寨遗址出土的二期制品，高 5.8 厘米，直径 3 厘米，泥质红陶手制而成，形如橄榄，略扁，表面凹凸不平并无纹饰，中空，轻轻摇动会发出沉重的音响



图二十五　山西万荣荆村陶响铃



图二十六　四川大溪文化球形陶响铃，1974 年湖北松滋桂花树遗址出土的晚期制品，直径 3.6 厘米，细泥红陶，饰双股锥刺米字纹，有六个镂孔



图二十七　湖北京山朱家嘴陶响铃（屈家岭文化），直径 3.5 厘米，细泥黑陶，体内装有豌豆大小的烧制陶丸十数粒，摇动作响。体表饰六个对称的三股锥刺篦点米字纹，米字纹中心交点上各有一个圆形镂孔，制作相当精良。

致 谢

随着这篇毕业论文的完成，我攻读硕士学位的三年学习生活也就要结束了，在即将离开我学习生活了三年的母校时，我无比真诚地希望能有机会向我敬爱的导师高兴先生表达自己发自内心的真挚谢意！古人云：“师者，所以传道授业解惑也。”今人道：“学高为师，德高为范。”作为一名人民教师，高兴先生无疑完全符合了上述要求。在跟随先生学习的三年中，我深深地被先生严谨的治学态度和认真的工作精神所感动，而先生对学生的关爱和对原则的坚持更是给所有了解他的人留下了永远难以忘怀的深刻印象。实事求是地说，先生不仅教给了我们如何治学，而且更重要的是教给了我们如何做一个真正的人。生活在今天的我们，能够体会这是多么地难得！在此，我觉得我绝不仅仅只是代表自己向先生表达无尽的感谢，而是还代表所有没有机会当面向先生表示谢意的学生。

同样的谢意希望能够送给王亮教授、刘红宾教授、杨建中老师、朱鲁军老师、丁国强老师，他们忘我的敬业精神、顽强的求学意志、对学生无微不至的关怀都深深地刻在了我们的脑海中。在我三年的硕士学习生活中，几位尊敬的老师曾经给我提出过宝贵的意见，使我受益非浅，在这里我再次向几位老师表达我真诚的谢意。

最后，感谢音乐学院、图书馆和研究生学院各位教导和帮助过我的老师，感谢所有帮助过我的同学、朋友，正是在老师的教诲之下，在朋友的帮助之下，我在山西大学的三年才有所收获。